

明 細 書

2005 JUL 2005

干渉装置

技術分野

- [0001] 本発明は、電子線バイプリズムを用いた波面分割型の電子線干渉装置あるいは一般の光学バイプリズムを用いた波面分割型の光学干渉装置に関する。

背景技術

- [0002] 光学干渉装置には、大別して振幅分割法によるものと波面分割法によるものがある。特殊な場合を除いて、一般の光学系(レーザー等)干渉装置では振幅分割が用いられる。振幅分割であれば、光学系に起因する位相歪みが相殺され、比較的簡単に観察対象の微小な位相分布を精度良く検出できるからである。一方、電子線干渉装置においては、非特許文献1(Q. Ru et al.: Ultramicroscopy 53, 1 (1994))に紹介されているような例を除いて、一般に波面分割法が用いられる。これは電子線に対する有効な振幅分割型ビームスプリッターが存在しないことに起因する。
- [0003] 電子線干渉装置では、1個の電子線バイプリズムを用いた波面分割型の干渉計のみが実用に供されている。この型の干渉計では、原理的に干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W を独立にコントロールできず、例えば試料が大きいなど広い干渉領域幅を必要とする場合には、干渉縞間隔が狭く、多数本の干渉縞からなる干渉像(ホログラム)、すなわち高い搬送空間周波数で記録された画像を解析しなければならなかった。また、逆に試料が小さく狭い範囲に高い搬送空間周波数の干渉像が必要な場合でも、必要な高搬送空間周波数を作り出した時には干渉領域幅が広がってしまい、空間的可干渉性の劣化からコントラストの低い干渉縞からなる(品質の低い)干渉像を解析しなければならなかった。
- [0004] これらの問題点に対応するために、各々の研究・実験に応じて電子光学系を設計、構築し直しているが、電子光学系の特徴(数段の凸レンズしかない、ハーフミラーが存在しないなど)から、最終的に得られる倍率が低くなるなどの制約がある。
- [0005] また、ホログラムの再生、位相像を抽出する際には、波面の断裂面より発生するフレネル回折波がコントラストの強い縞(フレネル縞)を発生させてしまい、計測にアーティ

ファクトを与え、高精度での位相計測に障害となっている。観察対象が弱位相物体の場合には、フレネル縞による位相分布を後から減算する方法(たとえば、非特許文献2:K. Harada et al.: J. Electron Microsc. 52, 369 (2003))、再生時のフーリエ空間で除去する方法、2枚のホログラムから強度として減算する方法(たとえば、非特許文献3:K. Harada and R. Shimizu: J Electron Microsc. 40, 92 (1991))、2枚のホログラムからフレネル縞の位相成分を抽出し減算する方法(特許文献1:国際公開第01/075394号パンフレット)などの対策が提案されているが、いずれも記録された後にフレネル縞による影響を除くという方法であった。これらのいずれも十分なものではなく、結果的に干渉領域を犠牲にしても、フレネル縞が強いコントラストを有する干渉領域の端を使用しない、のが現実的な解決策であった。一方、フレネル縞の形成を抑止するアイデアが、例えば、特許文献1(国際公開第01/075394号パンフレット)に提案されている。これによれば、波面分割境界からフレネル縞を発生させないために、観察面と等価な面上に遮蔽板を置き、波面分割素子の波面分割境界がその影の中に入るようにして、波面分割素子ではフレネル回折が起こらない状況が実現できる。しかし、この方法においても第1の問題点、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W の独立したコントロールには全く何の改善も得られない。

[0006] 特許文献1:国際公開第01/075394号パンフレット

非特許文献1:Q. Ru et al.: Ultramicroscopy 53, 1 (1994)

非特許文献2:K. Harada et al.: J. Electron Microsc. 52, 369 (2003).

非特許文献3:K. Harada and R. Shimizu: J Electron Microsc. 40, 92 (1991)

発明の開示

発明が解決しようとする課題

[0007] 本発明の課題は、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W を独立にコントロールできる電子線干渉装置あるいは一般の光学バイプリズムを用いた波面分割型の光学干渉装置を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明は、上記課題を解決するために、2個のバイプリズムを光軸上、電子線あるいは光の進行方向に対して順に2段に用いる。上段(電子線あるいは光の進行方向

の上流側)のバイプリズムに電子線あるいは光の遮蔽部となる部分を備えるとともに、上段のバイプリズムを観察試料の像面に配置し、下段のバイプリズムの波面分割境界を上段のバイプリズムによる遮蔽部の陰になる部分に配置する。それぞれのバイプリズムによる偏向角を選択することにより、二つの電子線あるいは光のオーバーラップ領域とオーバーラップ角度を任意に変化させる。上段のバイプリズムによる遮蔽部の位置を像面に合わせることで、従来問題となったフレネル縞の発生を回避すると共に、干渉縞間隔 s とそれが発生するオーバーラップ領域(干渉領域幅 W)を独立にコントロールする。

- [0009] 電子線干渉装置について、より、具体的に述べると、上段の電子線バイプリズムの電極を観察試料の像面に配置し、下段の電子線バイプリズムの電極を上段の電子線バイプリズムの電極の陰になる部分に配置し、その各々に印加する電位を変化させることにより、二つの電子線のオーバーラップ領域とオーバーラップ角度を任意に変化させるのである。

発明の効果

- [0010] 本発明によれば、バイプリズムを用いた干渉装置における干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W の2つのパラメータを、独立にコントロールすることができ、これにより、一度構築した光学系を変更することなく、干渉計の性能に直結した、空間可干渉性と搬送空間周波数を独立して取り扱える。その結果、ホログラフィによる観察対象を広げることができる。特に、電子線干渉装置では、上、下段の電子線バイプリズムそれぞれの電極の電圧を制御するだけで干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W の2つのパラメータを、任意かつ独立にコントロールすることができる。

発明を実施するための最良の形態

- [0011] 本発明は、電子線干渉装置あるいは一般の光学バイプリズムを用いた波面分割型の光学干渉装置に適用できるものであるが、以下に述べる実施例では電子線干渉装置を主体に説明し、一般の光学バイプリズムを用いた波面分割型の光学干渉装置については、最後に概要を述べるに止める。
- [0012] 図1Aは従来型の電子線バイプリズムを用いた干渉光学系を示す図である。電子線バイプリズムは電子線ホログラフィの光学系として最も一般的に用いられる装置で、

光学系で試料を透過した物体波21に参照波23が重ね合わされ、結果として試料の拡大像に干渉縞が重畳された干渉像を得る。電子線バイプリズムは、良く知られているように、中心部分に配置される極細線電極とこれを挟む形の両端電極より構成され、両端電極を接地電位とし、中心部分に配置される電極の電位を制御して電子線バイプリズムを通過する電子線を偏向させるものである。本願の明細書で電子線バイプリズムの電極というのは中心部分に配置される極細線電極の意味であり、接地電位に置かれる両端電極については言及しない。

[0013] 図1Aにおいて、1は電子源、2は光軸、3は試料、5は対物レンズ、7は電子源像面、9は電子線バイプリズム電極、11は観察面、12は試料の像、13はフィルムあるいはカメラ等の撮像手段である。ここで、電子源1は、図では、単一のブロックで示しているが、光源、加速管さらには照射光学系を含むものである。電子源1で発生された電子線は光軸2の一方側に配置された試料3を透過する物体波21と試料3の無い側を透過する参照波23とに分かれる。物体波21および参照波23は対物レンズ5で屈折されて電子源像面7で交叉して観察面11の方に進む。物体波21および参照波23は、さらに、電子源像面7と観察面11の間に設けられた電子線バイプリズム電極9により偏向され、観察面11上で重ね合わされる。その結果、観察面11上で試料の拡大像12に干渉縞が重畳された干渉像を得ることができる。観察面11に得られた干渉像は撮像手段13により使用者に供される。ここで、観察面11に現れる干渉縞干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W を撮像手段13の下に模式的に表示した。なお、25および27は電子線バイプリズム電極9により偏向された物体波21および参照波23の仮想的な電子源位置である。また、30は電子線バイプリズム電極9による影であり、煩雑を避けるため、光軸2の左側に発生する陰のみを描いている。なお、前記試料は、これを保持するための試料保持装置により対物レンズ5の上流部に置かれるが、試料保持装置は図示を省略する。

[0014] ここで、 λ を電子源1の電子線の波長、 γ は光軸2を中心に仮想的な電子源25と27が成す角度、 α を電子線バイプリズムによる電子線の偏向角度(rad)、 d を電子線バイプリズム電極9の直径、 L を電子線バイプリズム電極9と観察面11との距離、 b を対物レンズ5と観察面11との距離、 b_0 を対物レンズ5と電子源像面7との距離、 D を観

察面11と電子源像面7との距離、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W は、式(1)、(2)の様に表される。

[0015] [数1]

$$s = \frac{\lambda}{\gamma} = \frac{(b-b_0)\lambda}{2\alpha(b-b_0-L)} = \frac{D\lambda}{2\alpha(D-L)} \quad \text{--- (1)}$$

[0016] [数2]

$$\begin{aligned} W &= 2\alpha L - \frac{b-b_0}{b-b_0-L} d \\ &= \frac{2\alpha}{\lambda} \left\{ \frac{2\alpha L(b-b_0-L)}{b-b_0} - d \right\} \cdot s \\ &= 2\alpha L - \frac{2\alpha}{\gamma} d \quad \text{--- (2)} \end{aligned}$$

電子線の偏向角度 α (rad)は、電子線バイプリズム電極9への印加電圧 V_f (V)と偏向係数 k を用いて $\alpha = k \cdot V_f$ で表される。

[0017] 実用上、使用者に必要なホログラムは試料に対して記録されねばならないので、上記式(1)、(2)を試料面へ換算して、試料面での干渉縞間隔 s_{obj} と干渉領域幅 W_{obj} を式(3)、(4)の様に得る。

[0018] [数3]

$$s_{obj} = \frac{a(b-b_0)\lambda}{2\alpha b(b-b_0-L)} \quad \text{--- (3)}$$

[0019] [数4]

$$W_{obj} = \frac{2\alpha a L}{b} - \frac{a(b-b_0)}{b(b-b_0-L)} d = \frac{2\alpha}{\lambda} \left\{ \frac{2\alpha L(b-b_0-L)}{b-b_0} - d \right\} \cdot s_{obj} \quad \text{--- (4)}$$

ここで、 a は対物レンズ5と試料3との距離である。なお、上記の各式には現れていないが、 a_0 は対物レンズ5と電子源1との距離、 f は対物レンズ5の焦点距離である。上記各式の導出にあたっては、光源、および試料に対するレンズの公式(5)を用いて

いる。

[0020] [数5]

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{f} &= \frac{1}{a_0} + \frac{1}{b_0} \\ \frac{1}{f} &= \frac{1}{a} + \frac{1}{b} \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (5)}$$

式(1)、(2)あるいは式(3)、(4)を対比して分かるように、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W は、ともに、電子線の偏向角度 α によって影響を受けるから、お互いに独立に制御することはできない。

[0021] さらに、実際に得られる干渉縞には、図1Bに示すごとく、電子線バイプリズム電極9からのフレネル縞が重畳されており、図1Cに示すごとく、再生位相像中にアーティファクトの位相分布を作り出す。これを図1Aで説明すると、干渉縞は電子線バイプリズム電極9により偏向された物体波21および参照波23が観察面11の面上で干渉することによって生起されるが、電子線バイプリズム電極9が存在することによってその端面からフレネル回折波29が生じて、観察面11上にフレネル縞を生じているのである。

[0022] このフレネル縞による位相分布を何らかの方法で検出・記録しておき、得られた再生像から減算して、フレネル縞による位相分布の影響を回避する対策が、背景技術で説明した非特許文献2, 3のように提案されている。しかし、フレネル縞は電子線バイプリズム電極9への印加電圧(バイプリズム電極9の電子線偏向角度)に依存して変化するため、各々の実験条件、すなわち印加電圧を変化させるごとに対策を行わなければならない、これらの回避策はあまり実用的でない。また、位相変化が大きな試料では、記録されるフレネル縞までが位相変調を受けるので、単純な減算法では除去できない(むしろ新たなアーティファクトを与える)。つまり、フレネル縞を発生させないのが最も原理的に有効な対策となる。

[0023] (本発明の基本構成)

図2は本発明を電子線干渉装置に適用したときの光学系の実施例を示す図である

。本発明の電子線干渉装置は電子線バイプリズムを光軸上に上下2段に配置する。上段の電子線バイプリズムの電極を試料の像面(第1像面)に配し、それ以降の下段の光学系で、試料像と共に拡大・縮小を行う。下段の電子線バイプリズム電極は通常の干渉計として機能する。

[0024] 図2において、1は電子源、2は光軸、3は試料、5は対物レンズ、7は第1の電子源像面、31は第1像面、32は第1像面31上の試料像、33は拡大レンズ、35は第2の電子源像面、11は観察面、12は試料の像、13はフィルムあるいはカメラ等の撮像手段、 9_u は第1像面31上に設けられた上段電子線バイプリズム電極でその直径は d_u である。 9_b は第2の電子源像面35と観察面11との間に設けられた下段の電子線バイプリズム電極でその直径が d_b である。図2でも、25および27は電子線バイプリズム電極 9_b により偏向された物体波21および参照波23の仮想的な電子源像の位置である。また、観察面11に現れる干渉縞の干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W を撮像手段13の下に模式的に表示した。

[0025] 図2においても、図1Aに示す従来例と同様に、電子源1で発生された電子線は光軸2の一方側に配置された試料3を透過する物体波21と試料3の無い側を透過する参照波23とに分かれる。図2では、参照波23にパターン表示を付すのは省略した。物体波21および参照波23は対物レンズ5で屈折されて第1電子源像面7で交叉して拡大レンズ33の方に進む。物体波21および参照波23は第1像面31上で試料像32を形成するとともに、第1像面31上で上段電子線バイプリズムを通過するが、図2では、ここでは偏向されないで、拡大レンズ33で屈折されて観察面11の方に進む。次いで、第2電子源像面35と観察面11の間に設けられた下段電子線バイプリズムを通過するが、ここでは偏向され、観察面11上で重ね合わされる。このときの偏向角が α_b である。その結果、観察面11上で試料の拡大像12に干渉縞が重畳された干渉像を得ることができる。観察面11に得られた干渉像は撮像手段13により使用者に供される。

[0026] ここで、上下2段に配置される電子線バイプリズムの電極の大きさについてみると、下段電子線バイプリズム電極 9_b は上段電子線バイプリズム電極 9_u の影に入るように倍率、位置関係を選ぶことが必要である。そうすれば、下段電子線バイプリズム電極

9_bには電子線がぶつからないので、電子線の散乱が無く、原理的にフレネル縞は発生しない。尤も、厳密には上段電子線バイプリズム電極9_uはフレネル回折波を発生し、これが全空間に広がっているから、この回折波が、2次的に下段電子線バイプリズム電極9_bでもフレネル縞を発生させるが、その強度は無視できる程度に十分小さい。上段電子線バイプリズム電極9_uにより生起したフレネル回折波自身は、上段電子線バイプリズム電極9_uが第1像面31上に設置されているので、観察面11上に像として収束する。その結果、観察面11上にはどちらの電子線バイプリズム電極によるフレネル縞も形成されないことになるから、フレネル縞の重畳されない干涉縞を得ることができる。

[0027] ここで、a_bを第1像面31と拡大レンズ33との距離、a_uを対物レンズ5と試料3との距離、b_bを拡大レンズ33と観察面11との距離、b_uを第1像面31と対物レンズ5との距離、b₂を拡大レンズ33と第2の電子源像面35との距離、λを電子源1の電子線の波長、α_bを下段電子線バイプリズム電極9_bによる電子線の偏向角度(rad)、L_bを下段電子線バイプリズム電極9_bと観察面11との距離、M_bを拡大レンズ33の試料3に対する倍率、M_uを対物レンズ5の試料3に対する倍率、D_bを第2の電子源像面35と観察面11との距離、d_uを上段電子線バイプリズム電極9_uの直径とすると、実施例の光学系での試料面へ換算した干涉縞間隔sと干涉領域幅Wは式(6)、(7)で表わすことができる。

[0028] [数6]

$$s_{Obj} = \frac{a_b}{b_b} \cdot \frac{a_u}{b_u} \cdot \frac{(b_b - b_2)\lambda}{2\alpha_b(b_b - b_2 - L_b)} = \frac{1}{M_b} \cdot \frac{1}{M_u} \cdot \frac{D_b\lambda}{2\alpha_b(D_b - L_b)} \quad \text{--- (6)}$$

[0029] [数7]

$$W_{Obj} = \frac{a_b}{b_b} \cdot \frac{a_u}{b_u} \cdot 2\alpha_b L_b - \frac{a_u}{b_u} d_u = \frac{1}{M_b} \cdot \frac{1}{M_u} \cdot 2\alpha_b L_b - \frac{1}{M_u} d_u \quad \text{--- (7)}$$

なお、上記の各式には現れていないが、a₁は対物レンズ5と電子源1との距離、b₁は対物レンズ5と第1電子源像面7との距離、a₂は第1電子源像面7と拡大・縮小レンズ33との距離、D_uは第1電子源像面7と第1像面31との距離、d_bは下段電子線バイ

プリズム電極 9_b の直径、 f_1 は対物レンズ5の焦点距離、 f_2 は拡大・縮小レンズ33の焦点距離である。上記各式の導出にあたっては、光源、および試料に対するレンズの公式(8)を用いている。

[0030] [数8]

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{f_1} &= \frac{1}{a_1} + \frac{1}{b_1} \\ \frac{1}{f_2} &= \frac{1}{a_2} + \frac{1}{b_2} \\ \frac{1}{f_1} &= \frac{1}{a_u} + \frac{1}{b_u} \\ \frac{1}{f_2} &= \frac{1}{a_b} + \frac{1}{b_b} \end{aligned} \right\} \quad \text{--- (8)}$$

また、上下2段の電子線バイプリズムのそれぞれの電極 9_u の直径 d_u と電極 9_b の直径 d_b との関係が満たさなければならない条件は式(9)で与えられる。

[0031] [数9]

$$d_b \leq \frac{b_b - b_2 - L_b}{b_b - b_2} \cdot \frac{b_b}{a_b} d_u = \frac{D_b - L_b}{D_b} \cdot M_b d_u \quad \text{--- (9)}$$

これは上段電子線バイプリズム電極 9_u の陰に下段電子線バイプリズム電極 9_b が入らなければならないことから導かれる関係で、下段光学系の倍率とその光学系での電子線バイプリズム電極の位置によって決まる。一般的には、電子線バイプリズム電極の直径は $1\mu\text{m}$ 程度であり大きく変化することはない。

[0032] なお、電子光学系での実効性より図2、式(9)では、下段バイプリズム電極 9_b は拡大レンズ33と観察面11の間に位置するとして説明したが、上段バイプリズムの陰になる部分であればどの位置に配置しても同様の効果が得られる(例えば図8に示すごとく、拡大レンズ33の上でもよい)。さらには下段バイプリズム電極 9_b によるフレネル縞の発生を回避せず、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W の独立コントロールのみを必要とするならば、式(9)などの条件を満たす必要はない。

[0033] また、上述の説明では、拡大光学系についてのみ説明したが、本発明は、縮小光学系でも、同様に実現できるものである。縮小光学系とした時は、上述の「拡大」を「縮小」と、読み替えればよい。なお、図2では、上段電子線バイプリズム電極 9_u および下段電子線バイプリズム電極 9_b が、ともに、紙面に垂直に表示されているが、電子線が上段電子線バイプリズム電極 9_u から下段電子線バイプリズム電極 9_b に到達するまでに、拡大レンズ33が介在しているから、当然、電子線はこれにより曲げられ(回転される)ているので、これに応じた角度だけ、相対的にずれていることは言うまでもない。さらに、本発明では、電子線バイプリズムが適宜位置を変えて使用され、電子線バイプリズム電極の電圧も制御されるが、これらの構造については、当業者が容易に理解できることであるので、その図示は省略する。

[0034] 干渉縞間隔・干渉領域幅のコントロールについて、以下説明する。

[0035] (制御例1)

波面分割による干渉縞の形成は、2つの虚光源が作り出すものに他ならない。下段のバイプリズム電極 9_b に電圧を印加して偏向角度 α_b を作り出すと、光源は図2に示すごとく、図中のy軸上を左右に虚光源25, 27としてスプリットして分離してゆき、像面上で波面がオーバーラップした部分に式(6)(7)で表される干渉縞を形成する。

[0036] (制御例2)

ここでは、上段のバイプリズム電極 9_u にも電圧を印加して、電子線に偏向を加えた場合について図3に示す光学系を参照して説明する。上段のバイプリズムによる偏向で電子線を光軸2に向かわせて干渉縞間隔sを細かくする制御である。図3において図2で示すものと同じもの又は同等のものに同じ参照符号を付した。また、26および28は電子線バイプリズム電極 9_u により偏向された物体波21および参照波23の実電子源像の位置である。 Y_r は上段電子線バイプリズムの電極 9_u による電子源像の光軸からのスプリット距離、 Y_v は下段電子線バイプリズムの電極 9_b による仮想的な電子源像の光軸からのスプリット距離である。

[0037] 観察面11は上段電子線バイプリズムの電極 9_u のインフォーカス像面であるため、上段の電子線バイプリズムでの偏向作用は像形成に関係なく、波面のオーバーラップは生じない。しかし、電子線への偏向は実として行われているため、実光源像のスプ

リット26, 28が生じている。これは下段の電子線バイプリズムによる仮想的な光源像のスプリット25, 27と本質的に同じものである。それぞれのバイプリズムによる光源像のy軸上のスプリット距離 Y_v 、 Y_r を式(10)、(11)で与える。

[0038] [数10]

$$Y_v = \alpha_b (b_b - b_2 - L_b) = \alpha_b (D_b - L_b) \dots (10)$$

[0039] [数11]

$$Y_r = \frac{b_2}{a_2} \cdot \alpha_u (b_u - b_1) = M_2 \cdot \alpha_u D_u \dots (11)$$

ここで M_2 は下段光学系による光源に対する倍率 b_2/a_2 である。

[0040] 近軸近似が成立する電子光学系の場合には、光源のトータルのスプリット距離はリニアに加算すればよいので、両バイプリズムを同時に作用させた場合の干渉縞は式(12)、(13)の様に表される。

[0041] [数12]

$$\begin{aligned} s_{Obj} &= \frac{a_b}{b_b} \cdot \frac{a_u}{b_u} \cdot \frac{a_2 (b_b - b_2) \lambda}{2 \{ \alpha_b a_2 (b_b - b_2 - L_b) + \alpha_u b_2 (b_u - b_1) \}} \\ &= \frac{1}{M_b} \cdot \frac{1}{M_u} \cdot \frac{a_2 D_b \lambda}{2 \{ \alpha_b a_2 (D_b - L_b) + \alpha_u b_2 D_u \}} \dots (12) \end{aligned}$$

[0042] [数13]

$$\begin{aligned} W_{Obj} &= \frac{a_b}{b_b} \cdot \frac{a_u}{b_u} \cdot 2 \alpha_b L_b - \frac{a_u}{b_u} d_u \\ &= \frac{1}{M_b} \cdot \frac{1}{M_u} \cdot 2 \alpha_b L_b - \frac{1}{M_u} d_u \dots (13) \end{aligned}$$

これまでに与えられた関係式を概観すると、式(7)と式(13)は同じものである。これは干渉領域幅 W が上段のバイプリズムによる偏向角度 α_u に依存しないことを意味しており、このことが、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W の独立したコントロールを可能にする。すなわち、

(1) 下段バイプリズム→干渉領域幅Wを定める。

(2) 上段バイプリズム→干渉縞間隔sを調整する。

という手順で独立操作が可能となる。さらに、下段バイプリズムの電極 9_b が光源の像の位置に置かれている($D_b - L_b = 0$)場合を考えると、この場合には式(12)により干渉縞間隔sは偏向角度 α_b に依存しない。すなわちこの光学条件では、干渉縞間隔sと干渉領域幅Wに関して完全に独立なコントロールが可能となる。

[0043] しかしながら、一般的には、通常の電子顕微鏡では、レンズの焦点距離の自由度の制限から、 $D_b - L_b = 0$ の関係を作り出すことは困難な場合が多いと考えられる。従って図3に示した光学系により、上述の手順に依るのが、現実的な操作法と言える。

[0044] さらに面白いことには、光源の像を下段バイプリズムの下に作り($D_b - L_b < 0$)、式(12)の分母が負になるような光学系を構成すると、干渉縞間隔sと干渉領域幅Wの増減の関係が逆転する。すなわち、干渉縞間隔sを大きくするほど干渉領域幅Wが小さくなる光学系となる。これは干渉縞間隔の広いホログラムの形成に有効であるが、この場合でも干渉縞を無くすこと、すなわち物体波21と参照波23の伝播方向を一致させることはできない。

[0045] (制御例3)

図4は、図3とは逆に、干渉縞間隔sを広げる際の光学系を示す図である。図4において図3で示すものと同じもの又は同等のものに同じ参照符号を付した。図3を参照して説明したように、上段バイプリズムにて電子線を光軸2に向かうように偏向し干渉縞間隔sを小さくすることは容易である。これに対して、図4に示すように、上段バイプリズムにて電子線を光軸から離れるように偏向して干渉縞間隔sを広げるには、下段電子線バイプリズム電極 9_b の存在が制限を与える。その条件を、式(14)に示す。

[0046] [数14]

$$\alpha_u \geq \frac{a_2}{b_2} \frac{1}{D_u} \frac{\left\{ \frac{b_b}{a_b} d_u (D_b - L_b) - d_b D_b \right\}}{2L_b}$$

$$= \frac{\{M_b d_u (D_b - L_b) - d_b D_b\}}{2M_2 D_u L_b} \quad \text{--- (14)}$$

干渉縞間隔 s が十分に広げられ、電子線のみで、いわゆる干渉顕微鏡像が形成できればそれにこしたことは無いが、基本的に物体波21と参照波23を同じ光学系で同方向に伝播させなければならないため、電子顕微鏡における波面分割型の干渉計では、ほぼ、実現不可能である。本発明においても、図3に示すように、干渉縞間隔 s を小さくすることは容易であるが、図4に示すように、広げる場合には、下段電子線バイプリズム電極9によるフレネル回折波が発生してしまう。制御例3では、干渉縞間隔 s を大きく広げるときにはフレネル回折波の発生を抑止できないので、従来例で採られた対策をとることが必要である。

[0047] (制御例4)

次に、逆位相ホログラムの形成について述べる。

[0048] 本発明による光学系には図3、4に示した物体波21、参照波23の重畳角度の場合と、物体波21と参照波23の重畳角度が逆になった場合の2通りの可能性がある。すなわち、図5は、図4と同様の光学系であるが、上段のバイプリズムによって電子線を光軸から離れる方に大きく偏向させ、結像させたい波面が下段電子線バイプリズムの電極9の下側を透過する様に条件が選ばれている場合、別の言い方をすれば、仮想的な光源の像25、27の光軸2に対する位置が、図3、4の仮想的な光源の像25、27の位置と左右反転している光学系を示す図である。図5において図3、図4で示すものと同じもの又は同等のものに同じ参照符号を付した。

[0049] この状態で下段のバイプリズムをこれまでと逆に作用させて干渉縞を作り出す。このとき、うまく条件を選べば、図3、4と全く等価な、但し、物体波21と参照波23を重畳させる角度が逆になったホログラムが作り出せる。すなわち見かけの位相変化が逆転したホログラムを作成することが可能となる。このような位相変化が逆転した2枚のホログラムの差分を取れば、位相差を2倍に増幅した精度の高い再生像を得ることが可能になる。またこれらの2枚のホログラムで二重露光法を行えばそのまま直ちにモアレ法と同等で、かつ2倍に位相差増幅した干渉顕微鏡像を得ること(位相差増幅二重露光法)が可能となる。

[0050] (実験結果)

まず、フレネル縞発生回避の実現について述べる。

- [0051] 図6Aは従来の干渉計による干渉縞形成の様子を示す図、図6Bは図6Aと同じ干渉縞間隔 s でフレネル縞の発生を回避して干渉領域幅 W を変化させた干渉縞形成の様子を示す図、図6Cは本発明により干渉領域幅 W を変化させることなく干渉縞間隔 s を変化させた干渉縞形成の様子を示す図である。いずれの場合も試料3は除去されている。図の左に示す像は種々の条件での干渉縞を順に配列したものであり、図の右側に示すのは干渉縞形成の条件である。図6Aに付記した「F1:OUT」は上段のバイプリズムを光軸からはずしたことを意味する。それぞれの図で V_{F1} は上段電子線バイプリズム電極 d_u への印加電圧である。 V_{F2} は下段電子線バイプリズム電極 9_b への印加電圧である。すなわち、従来の干渉計とは、上段のバイプリズムを光軸からはずして図1Aに示す構造にしたものである。また、実験に用いた電子線バイプリズム電極 9_u 、 9_b のそれぞれの直径は、上段電極 d_u が $1.6\mu\text{m}$ 、下段電極 d_b が $0.8\mu\text{m}$ であった。
- [0052] 図6Aの最上段の像の中央部の黒い部分は下段電子線バイプリズム電極 9_b の像である。下段電子線バイプリズム電極 9_b の電圧を増加させるにつれて、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W がともに変化している。さらに、いずれの条件下でも、干渉縞の両端部には電子線バイプリズム電極 9_b からのフレネル干渉縞が見られる。
- [0053] 図6Bでは、これに対して、図2に示すように、上下2段に電子線バイプリズムを配して、下段電子線バイプリズム電極 9_b への印加電圧のみを制御した例である。図6Bの最上段の像の中央部の黒い部分は上段電子線バイプリズム電極 9_u の像である。その下の段の像の中央部の黒い部分は下段電子線バイプリズム電極 9_b による偏向を受けて上段電子線バイプリズム電極 9_u の像が縮小された状態で見えている像である。第3段目以下の干渉縞は、上段電子線バイプリズム電極 9_u の電圧 $V_{F1}=0$ で決まる干渉縞間隔 s （これは図6Aのそれと同じである）、下段電子線バイプリズム電極 9_b の電圧に対応する干渉領域幅 W の干渉縞が得られている。
- [0054] 図6Bと図6Aの干渉縞を対比して分かるように、図6Bでは、図6Aで見られた干渉縞の両端部のフレネル干渉縞が全く存在せず、干渉計として必要な干渉縞だけが記録されている。なお、図6Bでは干渉領域幅 W が小さくなっているが、これは上段電子線バイプリズム電極 9_u を細くすることにより広げることが可能である。

[0055] 次に、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W とが独立に制御できることを示す。

[0056] 図6Cは、上段バイプリズム電極 9_u の電圧をコントロールすることにより、干渉領域幅 W はそのままに、干渉縞間隔 s のみを変化させた結果である。図6Cでは、下段電子線バイプリズム電極 9_b の電圧は200Vに固定され、上段バイプリズム電極 9_u の電圧のみが-30Vから200Vまで変化させられている。図6Cの上から4段目の干渉縞が図6Bの最下段に示す干渉縞($V_{F1}=0V$ 、 $V_{F2}=200V$)であり、これは、図2の構成によるものである。図6Cの最上段から上から3段目までの干渉縞は、 V_{F1} を負電圧としたものであるから、図4の構成によって得られた干渉縞である。また、図6Cの上から5段目以降の干渉縞は、 V_{F1} 、 V_{F2} を共に正電圧としたものであるから、図3の構成によって得られた干渉縞である。

[0057] 図6Cの最下段に示す干渉縞($V_{F1}=V_{F2}=200V$)は干渉縞間隔 s がかなり細かく、これと同程度の縞間隔を作り出すには、従来法(図6A)では約450Vの印加電圧が必要であった。但し、従来法の場合には、干渉領域幅 W が大きく広がってしまい干渉性の劣化から十分なコントラストの縞が得られなかった。このことから、図3の構成は細かい干渉縞間隔 s の干渉縞を得るのに有効なものと言える。

[0058] (干渉顕微鏡像(ホログラム)のコントロール)

次に、干渉顕微鏡像(ホログラム)のコントロールについて述べる。

[0059] 図7A、図7Bおよび図7D、図7Eは、それぞれ、上下段バイプリズムの電極 9_u 、 9_b への印加電圧制御により偏向角度 α_u 、 α_b をコントロールして得られた一連のホログラムであり、図7C、図7Fはこれによる再生像を示す図である。図7Aは $V_{F1}=-20V$ 、 $V_{F2}=190$ の場合のホログラム、図7Bは $V_{F1}=50V$ 、 $V_{F2}=190$ の場合のホログラム、図7Cは、図7Bに示すホログラムからの再生像である。また、図7Dは $V_{F1}=-200V$ 、 $V_{F2}=-190$ の場合のホログラム、図7Eは $V_{F1}=-250V$ 、 $V_{F2}=-190$ の場合のホログラム、図7Fは、図7Eに示すホログラムからの再生像である。

[0060] 図7A、図7Bおよび図7D、図7Eに示すホログラムの干渉縞間隔 s は上段バイプリズムの電極 9_u への印加電圧 V_{F1} によりコントロールしたものであり、下段バイプリズム電極 9_b への印加電圧 V_{F2} を調整することにより、干渉領域幅 W が同じになる様に制御したものである。ここで、図7Aと図7Dを対比してより鮮明に分かるように、試料によっ

て位相変化の生じた干渉縞の縞線の変化が図7Aでは左上がりになっているのに対して、図7Dでは右下がりになっている。これは、制御例4で説明した、位相変化が逆転した2枚のホログラムが得られたことを意味する。したがって、それぞれの再生像である図7Cおよび図7Fではコントラストが反転している。また、これらの再生像を用いれば、位相差を2倍に増幅した精度の高い再生像を得ることが可能になる。またこれらの2枚のホログラムで二重露光法を行えばそのまま直ちにモアレ法と同等で、かつ2倍に位相差増幅した干渉顕微鏡像を得ること(位相差増幅二重露光法)が可能となる。

[0061] 電子線の可干渉性は主に干渉領域幅に依存し、干渉領域幅を広げるほど劣化するので、これらの像は同一の可干渉性を保ったまま、干渉計としての搬送空間周波数を変化させたものと言うことができる。従来の干渉計では、空間分解能の高い(記録干渉縞の細かい)ホログラムを記録しようとする、同時に干渉領域幅が広がってしまい、電子線の可干渉性の劣化によりコントラストの良い良質のホログラムが得られ難かったが、本発明によればこの欠点が克服できていることがわかる。

[0062] (応用への提案)

本発明では、電子線の干渉領域幅と干渉縞間隔を任意にコントロールできる。この利点に着目すると以下のような応用が可能である。

[0063] (1) 電子線の空間的可干渉性(コヒーレンス度)の計測と輝度の算出

光学に於いてはコヒーレンス度の計測は、例えば、F. Zernike: Physica 5, 50 (1938) に提案されているように、干渉縞のコントラストを測定して求められている(例えば、B. J. Thompson and E. Wolf: J. Opt. Soc. Amer. 47, 895 (1957))。電子光学系に於いても電子線バイプリズムを用いて同様の測定が行われた例(例えば、R. Speidel and D. Kurz: Optik 49, 173 (1977))はあるが、一般には行われていない。これは干渉する2波の距離、すなわち干渉領域幅 W を変化させるのに伴い干渉縞間隔 s も変化してしまい、記録系のMTF (Modulation Transfer Function) との切り分けが困難になるところに起因している。

[0064] 本発明では、2波の干渉距離を変化させても干渉縞間隔を一定に保つことができるため、MTFとの切り分けが容易であり、光源のコヒーレンス度を空間分布として計測

できる。さらに、その値から、電子源の輝度を求めることが可能となる。コヒーレンス度及び輝度は、従来はそれを測定するための特別な光学系(試料観察光学系とは異なる)を作成し評価していた。この方法は、厳密には光軸上のみで成立する輝度不変の法則に根拠を置いているため、本発明による実際に試料観察を行う光学系での直接測定には意味がある。

[0065] (2) 時間コヒーレンスの観測

上記とは逆に、空間的可干渉性(コヒーレンス)を一定に保ったまま干渉縞の本数を変化させることは、そのまま時間的コヒーレンスを観測していることになる。時間コヒーレンスの実験は、電子顕微鏡の分野ではほとんど例が無い。

[0066] (3) 記録媒体のMTFの計測

上記(2)と同様に、コヒーレンス度を一定に保ったまま、干渉縞間隔を変化させることも可能である。このことからコヒーレンス度の変化やレンズ条件など他の要因に左右されることなく、媒体に記録される空間周波数(縞間隔)を変化させることにより、記録媒体のMTF・解像度を計測できる。

[0067] (4) 高搬送空間周波数ホログラムの作成

本発明では、図3に示す構成で、図6C最下段の干渉縞に示したように、1段のバイプリズムでは与え得なかった大きな偏向角度を作り出し、高密度の干渉縞を得ることができる。すなわち、2段のバイプリズムを用いるため、耐電圧特性などの制約が抑圧でき、ホログラムとして10000本を越える干渉縞を記録することが可能となる。微小乳剤のフィルムを記録媒体に選べば、極めて密度の高い干渉縞を記録することも可能である。

[0068] (5) 量子細線、量子ドットの作成

電子線干渉縞は、電子線描画装置に代わり一度に多数の並行した細線を描くことが可能である。しかし、バイプリズムにより発生するフレネル縞が均一な細線の描画を妨げていた。本発明では、フレネル縞の発生を抑止できるため、均一なドーズ量の細線を描くことができる。この細線の間隔、線数を任意に変化させられるのは、上述のとおりである。また、この細線をX、Yの2方向から描画すれば、簡単に規則配列をした量子ドットが得られる。さらにこの2回の描画の方向をコントロールすることにより、4回

対称、6回対称、その他の対称性を持つ量子ドットの製作が可能である。

[0069] 以上は、直ちに実行可能な応用例である。これ以外にも、高分解能ホログラフィなど多数本かつ間隔の小さい干渉縞を要求される実験には有効である。

[0070] (3段以上のバイプリズムを備える電子線干渉装置への展開)

図8は、図3における構成の上段のバイプリズム9_uに加えて、さらに中間バイプリズム9_iを備えた電子線干渉装置の光学系を示す図である。上段のバイプリズム9_uによる偏向に加えて、中間バイプリズム9_iにより偏向を行わせることができるから、偏向の大きさが同じ程度であれば、それぞれのバイプリズムの耐電圧上有利となり、それぞれのバイプリズムの耐電圧を最大限生かした使い方をするときは、より大きい偏向を得ることができるから、干渉縞間隔をより小さいものとできる。

[0071] 同様の展開は、下段バイプリズムに対しても行うことが可能であり、干渉領域幅Wの制御についての自由度を大きくすることができる。さらには拡大・縮小レンズを伴ってバイプリズム電極を増やすことも可能であり、原理上装置の機械的スペースが許す範囲内で何段にでも増やした光学系を構築することが可能である。

[0072] (レーザ光等の光干渉装置への展開)

本発明は、レーザ光等の光干渉装置へ展開することが容易に出来る。すなわち、電子線バイプリズムの位置に光学バイプリズムを配置すれば良いからである。図9はこの考え方で構成した、図3に対応するレーザ光等の光干渉装置の光学系を示す図である。図3に示す構成要素と同じものあるいは、等価なものには同じ参照符号を付した。単純には、電子線バイプリズムが光学バイプリズム51、53で置換され、光学バイプリズム51の中心位置に光を遮蔽するための遮蔽板52を設けたものである。

[0073] 図9を参照して容易にわかるように、一般的には光学バイプリズムは、電子線バイプリズムのように、電圧を制御して偏向角 α を変えることができない。したがって、目標とする干渉縞間隔sおよび干渉領域幅Wに応じてこれを交換する必要があるもので、使用にあたっての煩雑さがある。しかし、これについては、光学バイプリズムの形状を成した容器を作り、内に例えば気体を封入しその圧力を可変とすることによって、すなわち密度を可変とすることによって、光学バイプリズムの屈折率を変化させ任意の角度偏向を行なったり、バイプリズムに変わって2枚の鏡の反射角度をコントロー

ルすることによって電子線バイプリズムと同等の効果を期待することはできる(例えば、K. Harada, K. Ogai and R. Shimizu: Technology Reports of The Osaka University 39, 117 (1989))。

[0074] (3段バイプリズムの応用形態の例)

図10A-図10Dは、図8と同じように、上段のバイプリズム、第3の中間バイプリズムおよび下段のバイプリズムを備えたホログラフィ顕微鏡光学系の光学系を、より一般的な電子顕微鏡の構成のいくつかの変形例について示す図である。図において図8と同じもの、または、同等の働きをするものには同じ参照符号を付した。また、図では電子源の電子線の代表の軌跡と試料の先端および根元位置の電子線の軌跡のみを示した。61は真電子源、63は第1コンデンサレンズ、65は第2コンデンサレンズである。これらは前述の実施例で示した電子源1を構成する。図からもわかるように、実施例で示した電子源1は真の電子源ではなく、真電子源61と複数のコンデンサレンズから得られるクロスオーバ(光源)である。電子源1から観察面11に向けて、対物レンズ5、第1中間レンズ67、第2中間レンズ69、第3中間レンズ71および投射レンズ73が配列される。

[0075] 図10Aは、図8と同じで、中間バイプリズムを上段バイプリズムの補助として用いる例であり、中間バイプリズム電極9_iは、第1中間レンズ67の上部に設ける。下段バイプリズム電極9_uは光源の第2像面35の下で試料の第2像面68(図8では11)の上に設ける。第2中間レンズ69が形成する試料の第3像面81に試料像は拡大投影され、第3中間レンズ71および投射レンズ73でさらに拡大されて、観察面11に最終拡大像を得る。図10Aの構成によれば、干渉縞間隔sを変化させるのは、上段バイプリズム電極9_uおよび中間バイプリズム電極9_iのいずれの電圧を変化させても良いから、上段バイプリズム電極9_uおよび中間バイプリズム電極9_iの電圧を小さくすることが出来、耐圧上有利となる。

[0076] 図10Bは、図10Aと同じで、中間バイプリズムを上段バイプリズムの補助として用いる例であり、中間バイプリズム電極9_iが、第1中間レンズ67の上部から下部に移された点を除けば同じである。但し、干渉縞間隔sおよび干渉領域幅Wのコントロールに要する電圧の大きさ、その正負は中間バイプリズム電極9_iの位置に依存して変化する。

る。

- [0077] 図10Cは、中間バイプリズムを上段バイプリズムの補助として用いる点では、図10A、図10Bと同じであるが、この構成では、図3で説明した($D_b - L_b = 0$)場合と同様に干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W に関して完全に独立なコントロールが可能となる。中間バイプリズム電極 9_i は、第1中間レンズ67の下部の試料の第2像面68に設ける。下段バイプリズム電極 9_b は第2中間レンズ69の下部の光源の第3像面83に設ける。この構成によれば、図10Aと同様、干渉縞間隔 s を変化させるのは、上段バイプリズム電極 9_u および中間バイプリズム電極 9_i のいずれの電圧を変化させても良いから、上段バイプリズム電極 9_u および中間バイプリズム電極 9_i の電圧を小さくすることが出来、耐圧上有利となるばかりでなく、干渉縞間隔 s の制御は上段バイプリズム電極 9_u および中間バイプリズム電極 9_i の電圧制御で、干渉領域幅 W は下段バイプリズム電極 9_b の電圧制御で、相互に影響を受けることなく、独立なコントロールが可能となる。
- [0078] 図10Dは、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W に関して完全に独立なコントロールを可能とする点において図10Cと同様であるが、中間バイプリズム電極 9_i が、第1中間レンズ67の下部の光源の第2像面35に設けられており、中間バイプリズムを下段バイプリズムの補助として用いる例である。
- [0079] 図11は、図10と同様に第3の中間バイプリズムを下段バイプリズムの補助として用いる他に、第4のバイプリズムを上段バイプリズムの補助として用いるホログラフィ顕微鏡の光学系の例を示す図である。上段電子線バイプリズム電極 9_u は試料の第1像面31上に設け、中間バイプリズム電極 9_i は、第1中間レンズ67の下部の光源の第2像面35に設ける。下段バイプリズム電極 9_b は光源の第3像面83上に設ける。そして、第4のバイプリズム電極 9_4 を、試料の第2像面68上に設ける。干渉縞間隔 s を変化させるための電圧制御を、上段バイプリズム電極 9_u および中間バイプリズム電極 9_i に分けることが出来るとともに、干渉領域幅 W を変化させるための電圧制御も下段バイプリズム電極 9_b と第4のバイプリズム電極 9_4 に分けることが出来るから、それぞれのバイプリズム電極の電圧を小さくすることが出来、耐圧上有利となる。
- [0080] これらの光学系はそれぞれ一例であり、図10A-図10D、図11を参照しても分かるように、本発明は、多様な形で実施できる。

産業上の利用可能性

[0081] 本発明は、電子線バイプリズムを用いた波面分割型の電子線干渉装置あるいは一般の光学バイプリズムを用いた波面分割型の光学干渉装置において、干渉縞間隔 s と干渉領域幅 W を独立にコントロールできる電子線干渉装置あるいは光学干渉装置を提供することができ、使用者の利便性を一段と向上させることができる。

図面の簡単な説明

- [0082] [図1A]従来型の電子線バイプリズムを用いた干渉光学系を示す図である。
- [図1B]実際に得られる干渉縞に電子線バイプリズム電極からのフレネル縞が重畳されている状態を示す図である。
- [図1C]再生位相像中にアーティファクトの位相分布が存在する状態を示す図である。
- [図2]本発明の電子線干渉装置の光学系を示す図である。
- [図3]図2に示す電子線干渉装置の上段のバイプリズム電極 9_u にも電圧を印加して、上段のバイプリズムでも偏向を加えた場合の光学系を説明する図である。
- [図4]図3とは逆に、干渉縞間隔を広げる際の光学系を示す図である。
- [図5]図4と同様の光学系であるが、上段のバイプリズムによって電子線をより大きく光軸から離れる方に偏向させ、結像させたい波面が下段電子線バイプリズム電極の下側を透過する様に条件が選ばれている場合の光学系を示す図である。
- [図6A]従来の干渉計による干渉縞形成の様子を示す図である。
- [図6B]本発明によりフレネル縞の発生を抑止した干渉縞形成の様子を示す図である。
- [図6C]本発明により干渉領域幅 W を変化させることなく干渉縞間隔 s を変化させた干渉縞形成の様子を示す図である。
- [図7A]上下段バイプリズムの電極 9_u 、 9_b への印加電圧制御により偏向角度 α_u 、 α_b をコントロールして得られたホログラムを示す図である。
- [図7B]図7Aとは異なる電圧値により得られたホログラムを示す図である。
- [図7C]図7Bに示すホログラムからの再生像を示す図である。
- [図7D]図7Aとは異なる電圧値により、見かけ上位相変化が逆転した様に得られたホ

ログラムを示す図である。

[図7E]図7Dとは異なる電圧値により得られたホログラムを示す図である。

[図7F]図7Eに示すホログラムからの再生像を示す図である。

[図8]図3における構成の上段のバイプリズム 9_u に加えて、さらに中間バイプリズム 9_i を備えた電子線干渉装置の光学系を示す図である。

[図9]図3における構成の電子線バイプリズムの位置に光学バイプリズムを配置して構成したレーザ光等の光干渉装置の光学系を示す図である。

[図10A]上段バイプリズムの電極 9_u 、中間バイプリズム電極 9_i および下段バイプリズムの電極 9_b を備え、第3の中間バイプリズム電極 9_i を第1中間レンズの上部に設けたホログラフィ顕微鏡の光学系を示す図である。

[図10B]上段バイプリズムの電極 9_u 、中間バイプリズム電極 9_i および下段バイプリズムの電極 9_b を備え、中間バイプリズム電極 9_i を第1中間レンズの下部に設けたホログラフィ顕微鏡の光学系を示す図である。

[図10C]上段バイプリズムの電極 9_u 、中間バイプリズム電極 9_i および下段バイプリズムの電極 9_b を備え、中間バイプリズム電極 9_i を第1中間レンズの下部の試料の第2像面に設けたホログラフィ顕微鏡の光学系を示す図である。

[図10D]上段バイプリズムの電極 9_u 、中間バイプリズム電極 9_i および下段バイプリズムの電極 9_b を備え、中間バイプリズム電極 9_i を第1中間レンズの下部の光源の第2像面に設けたホログラフィ顕微鏡の光学系を示す図である。

[図11]第3の中間バイプリズムを上段バイプリズムの補助として用いる他に、第4のバイプリズムを下段バイプリズムの補助として用いるホログラフィ顕微鏡の光学系の例を示す図である。

符号の説明

- [0083] 1…電子源、2…光軸、3…試料、5…対物レンズ、7…電子源像面、9…電子線バイプリズム電極、 9_u …上段電子線バイプリズム電極、 9_b …下段の電子線バイプリズム電極、11…観察面、12…試料の像、13…フィルムあるいはカメラ等の撮像手段、21…物体波、23…参照波、25, 27…第2の電子源像面35上の仮想的な電子源位置(電子源の虚像)、26, 28…第2の電子源像面35上の電子源の実像、30…電子線バ

イプリズム電極9による影、31…第1像面、32…第1像面31上の試料像、33…拡大
 レンズ、35…第2の電子源像面、29…フレネル回折波、 a …対物レンズ5と試料3との
 距離、 a_0 …対物レンズ5と電子源1との距離、 a_1 …対物レンズ5と電子源1との距離、 a_2
 …第1電子源像面7と拡大レンズ33との距離、 a_b …第1像面31と拡大レンズ33との
 距離、 a_u …対物レンズ5と試料3との距離、 b_1 …対物レンズ5と第1電子源像面7との
 距離、 b_2 …拡大レンズ33と第2の電子源像面35との距離、 b_b …拡大レンズ33と観察
 面11との距離、 b_u …第1像面31と対物レンズ5との距離、 f …対物レンズ5の焦点距
 離、 f_1 …対物レンズ5の焦点距離、 f_2 …拡大レンズ33の焦点距離、 λ …電子源1の
 電子線の波長、 γ …仮想的な2つの光源が試料面上に成す角度、 α …電子線バイ
 プリズム電極9による電子線の偏向角度、 α_u …上段電子線バイプリズム電極9_iによる
 電子線の偏向角度、 α_b …下段電子線バイプリズム電極9_bによる電子線の偏向角度
 、 L_b …下段電子線バイプリズム電極9_bと観察面11との距離、 M_b …拡大レンズ33の
 倍率、 M_u …対物レンズ5の倍率、 D_u …第1電子源像面7と第1像面31との距離、 D_b
 …第2の電子源像面35と観察面11との距離、 d …電子線バイプリズム電極9の直径、
 d_u …上段電子線バイプリズム電極9_uの直径、 d_b …下段電子線バイプリズム電極9_bの
 直径、51、53…光学バイプリズム、52…遮蔽板、61…真電子源、63…第1コンデン
 サレンズ、65…第2コンデンサレンズ、67…第1中間レンズ、68…試料の第2像面、
 69…第2中間レンズ、71…第3中間レンズ、73…投射レンズ、81…試料の第3像面
 、83…光源の第3像面。

請求の範囲

- [1] 電子線の光源と、前記光源から放出される電子線を試料に照射するための照射光学系と、前記電子線が照射する試料を保持するための試料保持装置と、前記試料の像を結像するためのレンズ系と前記試料像を観察あるいは記録するための装置を有し、電子線の光軸上で前記試料の配置される位置より電子線の進行方向の下流側に形成される前記試料の像面位置で光軸と直交する平面内に配置された上段のバイプリズムと前記レンズ系の1つもしくは複数のレンズを介して前記上段バイプリズムの前記光軸上の電子線の下流側で前記上段バイプリズムと互いに平行な平面内に配置される下段のバイプリズムとを備え、該両バイプリズムがそれぞれ独立にその位置の移動、電極の回転を行うことができるとともに、それら前記上段バイプリズムと前記下段バイプリズムにそれぞれ独立に電圧を印加できることにより、光軸を含む電子光学上の同一平面内で電子線を偏向させることを特徴とする干渉装置。
- [2] 前記下段バイプリズムが、前記電子線の光軸上第1番目の試料の像面の下流側に位置するレンズの下流側で、該レンズの形成する光源の像の下流側に位置する請求項1に記載の干渉装置。
- [3] 前記下段バイプリズムが、前記電子線の光軸上第1番目の試料の像面の下流側に位置するレンズの下流側で、該レンズの形成する光源の像面に位置する請求項2に記載の干渉装置。
- [4] 前記下段バイプリズムが、前記電子線の光軸上第1番目の試料の像面の下流側に位置するレンズの下流側で、該レンズと該レンズの形成する光源の像の間に位置する請求項1に記載の干渉装置。
- [5] 前記上段バイプリズムにより、電子線を互いに光軸に近づく方向に偏向するとともに、前記下段バイプリズムにより、さらに電子線の光軸に近づく方向に偏向する請求項2から4のいずれかに記載の干渉装置。
- [6] 前記上段バイプリズムにより、電子線を互いに光軸に近づく方向に偏向するとともに、前記下段バイプリズムにより、電子線が光軸から離れる方向に偏向する請求項2から4のいずれかに記載の干渉装置。
- [7] 前記上段バイプリズムにより、電子線を互いに光軸から離れる方向に偏向するととも

に、前記下段バイプリズムにより、電子線の光軸に近づく方向に偏向する請求項2から4のいずれかに記載の干渉装置。

- [8] 前記上段バイプリズムにより、電子線を互いに光軸から離れる方向に偏向するとともに、前記下段バイプリズムにより、さらに電子線が光軸から離れる方向に偏向する請求項2から4のいずれかに記載の干渉装置。
- [9] 前記上段バイプリズムと、前記電子線の光軸上第1番目に形成される試料の像面の下流側に位置するレンズとの間に位置し、前記上段バイプリズムと前記下段バイプリズムとが配置された各々の平面と互いに平行を成す第3の平面内に配置され、前記上段バイプリズムあるいは前記下段バイプリズムと独立に電圧の印加、並びにその位置の移動、電極の回転が行えることによって、該両バイプリズムが電子線を偏向させる光軸を含む電子光学上の同一平面内で電子線を偏向させることが可能な第3のバイプリズムを備える請求項1に記載の干渉装置。
- [10] 前記電子線の光軸上第1番目に形成される試料の像面の下流側に位置するレンズと前記レンズが形成する光源の像面との間、あるいは、前記光源の像面と前記レンズが形成する光軸上第2番目の試料の像面との間に位置し、前記上段バイプリズムと前記下段バイプリズムとが配置された各々の平面と互いに平行を成す第3の平面内に配置され、前記上段バイプリズムあるいは前記下段バイプリズムと独立に電圧の印加、並びにその位置の移動、電極の回転が行えることによって、該両バイプリズムが電子線を偏向させる光軸を含む電子光学上の同一平面内で電子線を偏向させることが可能な第3のバイプリズムを備える請求項1に記載の干渉装置。
- [11] 前記電子線の光軸上第1番目に形成される試料の像面の下流側に位置するレンズが形成する前記光軸上第2番目の光源の像面に位置し、前記上段バイプリズムと前記下段バイプリズムとが配置された各々の平面と互いに平行を成す第3の平面内に配置され、前記上段バイプリズムあるいは前記下段バイプリズムと独立に電圧の印加、並びにその位置の移動、電極の回転が行えることによって、該両バイプリズムが電子線を偏向させる光軸を含む電子光学上の同一平面内で電子線を偏向させることが可能な第3のバイプリズムを備える請求項1に記載の干渉装置。
- [12] 前記光軸上第2番目の試料の像面に位置し、前記上段バイプリズムと前記下段バ

イプリズムとが配置された各々の平面と互いに平行を成す第3の平面内に配置され、前記上段バイプリズムあるいは前記下段バイプリズムと独立に電圧の印加、並びにその位置の移動、電極の回転が行えることによって、該両バイプリズムが電子線を偏向させる光軸を含む電子光学上の同一平面内で電子線を偏向させることが可能な第3のバイプリズムを備える請求項1に記載の干渉装置。

- [13] 前記上段バイプリズムおよび前記下段バイプリズムを備え、前記光軸上第2番目の光源の像面に位置し前記上段バイプリズムと前記下段バイプリズムとが配置された各々の平面と互いに平行を成す第3の平面内に配置され、前記上段バイプリズムあるいは前記下段バイプリズムと独立に電圧を印加でき、且つ、その位置の移動、電極の回転が行えることによって該両バイプリズムが電子線を偏向させる光軸を含む電子光学上の同一平面内で電子線を偏向させることが可能な第3のバイプリズムを備えるとともに、前記光軸上第2番目の試料の像面に位置し、前記3枚の各々の平面と互いに平行を成す第4の平面内に配置され、前記上段バイプリズムあるいは前記下段バイプリズムあるいは前記第3のバイプリズムと独立に電圧を印加でき、且つ、その位置の移動、電極の回転が行えることによって前記3個のバイプリズムが電子線を偏向させる光軸を含む電子光学上の同一平面内で電子線を偏向させることが可能な第4のバイプリズムを備える請求項1に記載の干渉装置。

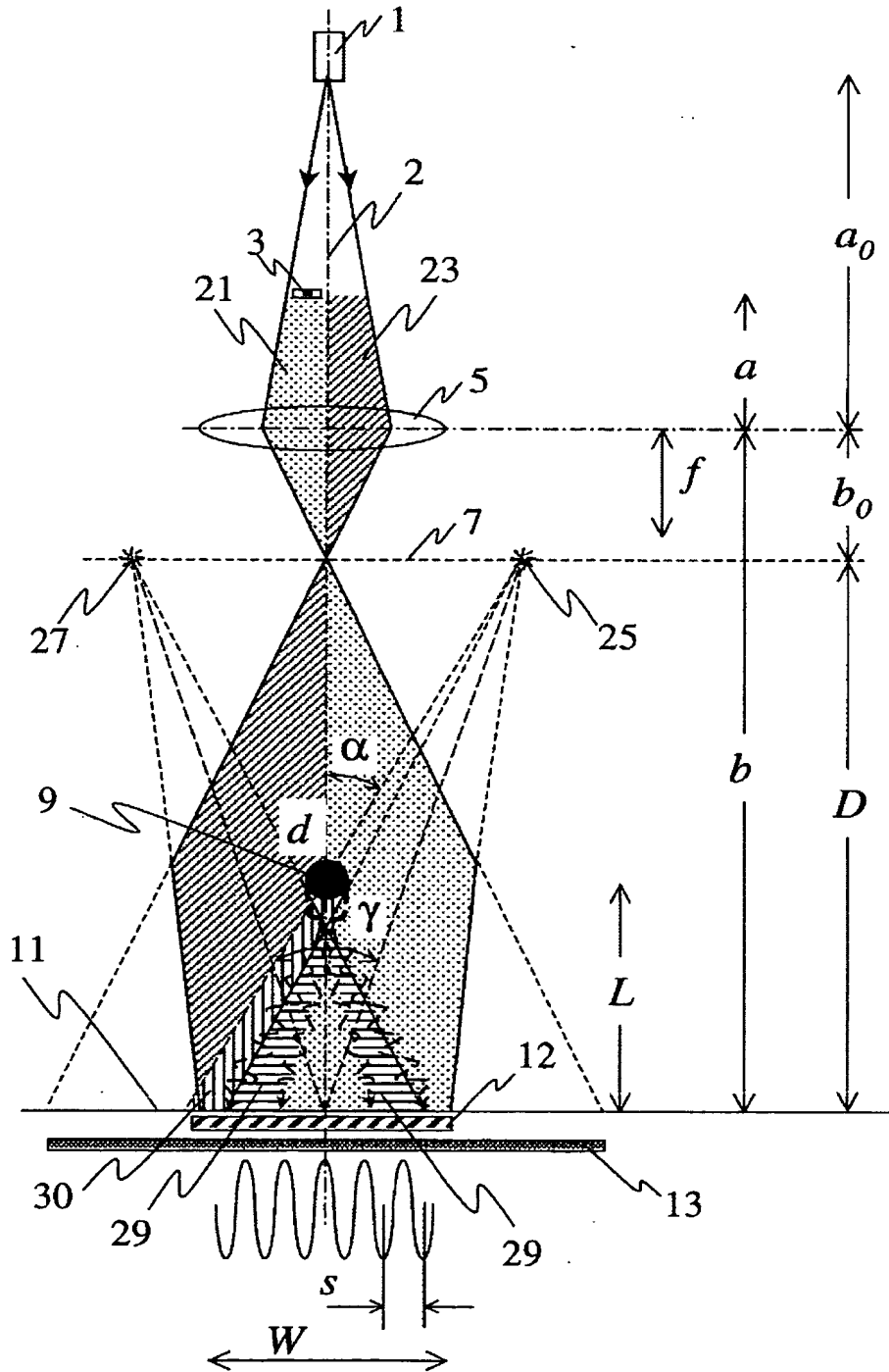
- [14] 光の光源と、前記光源から放出される光線を試料に照射するための照射光学系と、前記光線が照射する試料を保持するための試料保持装置と、前記試料の像を結像するためのレンズ系と前記試料像を観察あるいは記録するための装置を有し、前記光源の光線の光軸上前記試料の配置される位置より光線の進行方向の下流側に形成される前記試料の像面位置で光軸と直交する平面内に配置され、中央稜線部、あるいは稜線裏側に光線の遮蔽板を配置した上段の光学バイプリズムと前記レンズ系の1つもしくは複数のレンズを介して前記上段の光学バイプリズムの前記光軸上の光線の下流側で前記上段のバイプリズムと互いに平行な平面内に配置される下段の光学バイプリズムとを備え、該両バイプリズムがそれぞれ独立にその位置の移動、回転を行うことができるとともに、それら前記上段バイプリズムと前記下段バイプリズムとがそれぞれ独立に光線に対する偏向角度の異なるものと交換することにより偏向角


度を制御できることを特徴とする干渉装置。

- [15] 前記上段バイプリズムと前記下段バイプリズム、あるいは第3のバイプリズムあるいは第4のバイプリズムを有し、該光学系の観察記録面、あるいは観察記録面と光学上同等な面に配置された被照射材料に、平行な複数の直線を一括描画できる請求項1から13のいずれかに記載の干渉装置。
- [16] 前記上段バイプリズムと前記下段バイプリズム、あるいは第3のバイプリズムあるいは第4のバイプリズムのうち、用いる全てのバイプリズムが電子線の偏向面を同じくする関係を保ったまま電子線の光軸を中心に光軸に垂直な平面内を回転し、当該回転角度を変化させながら、該光学系の観察記録面、あるいは観察記録面と光学上同等な面に配置された被照射材料に、複数の照射を行える請求項1から13のいずれかに記載の干渉装置。
- [17] 前記光源が光の光源であり、前記各バイプリズムが光学バイプリズムからなる前記請求項15あるいは16に記載の干渉装置。

[図1A]


図1A




[1B]

1B



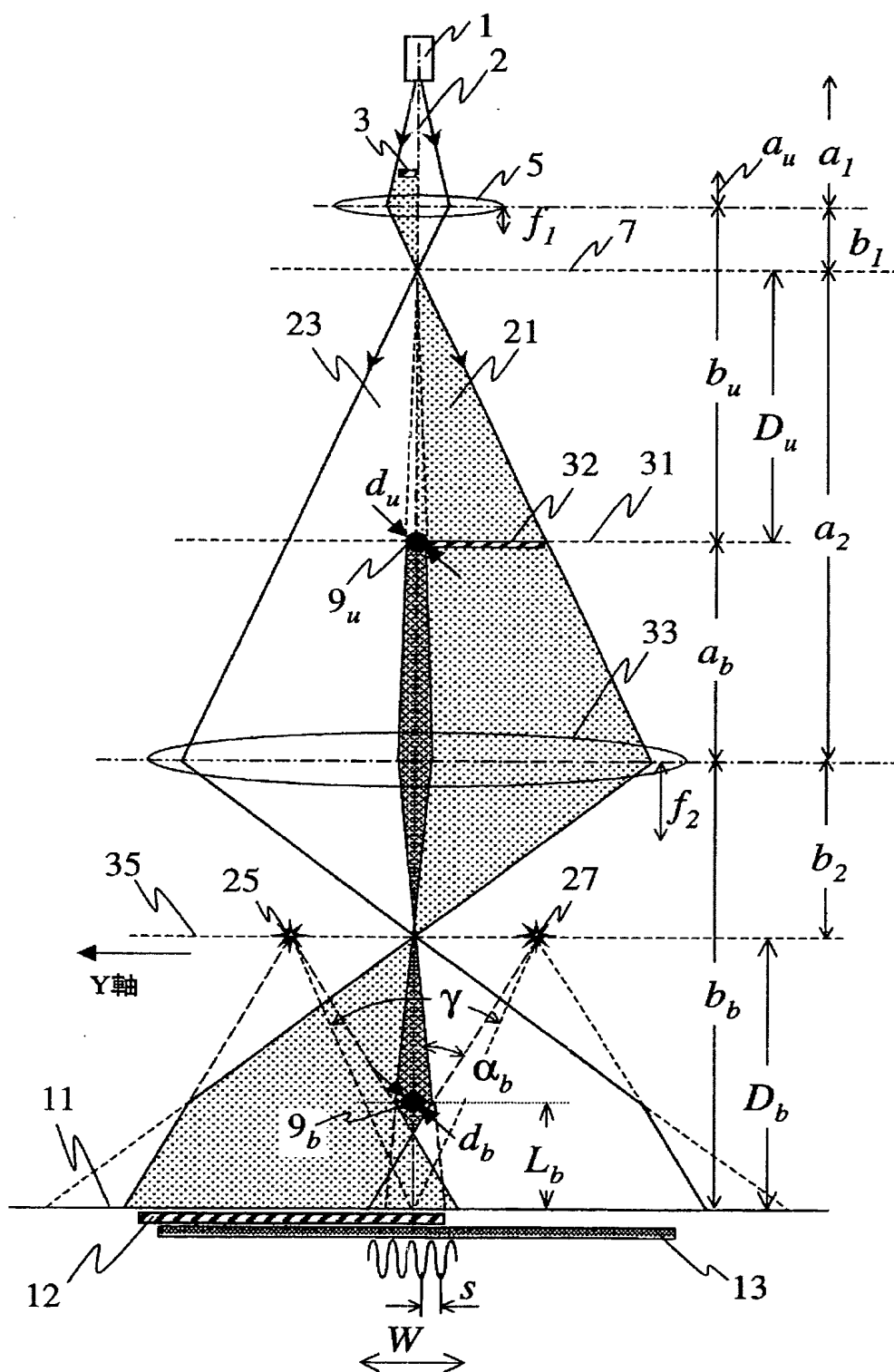
[1C]

1C



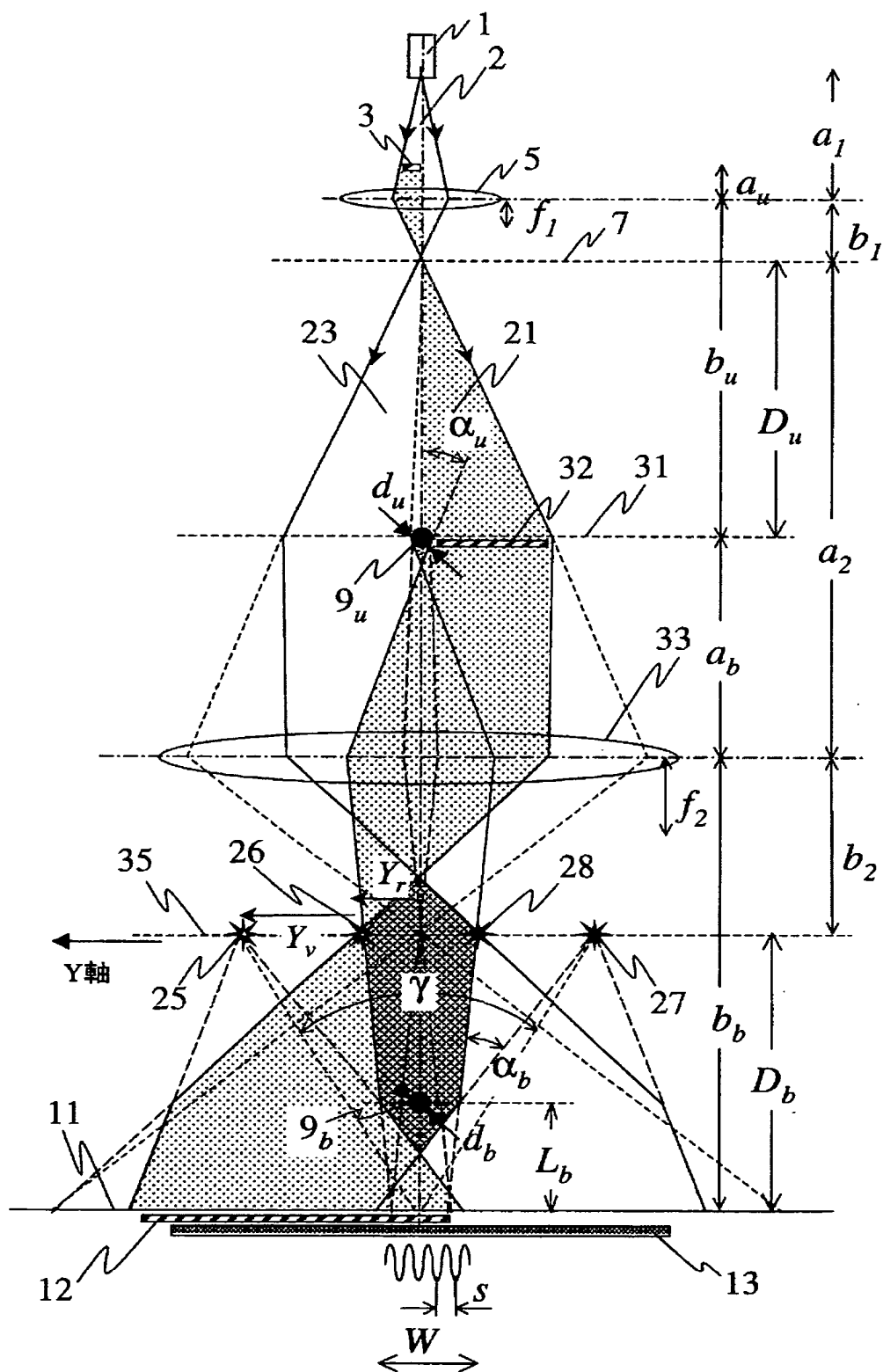
[図2]

図2

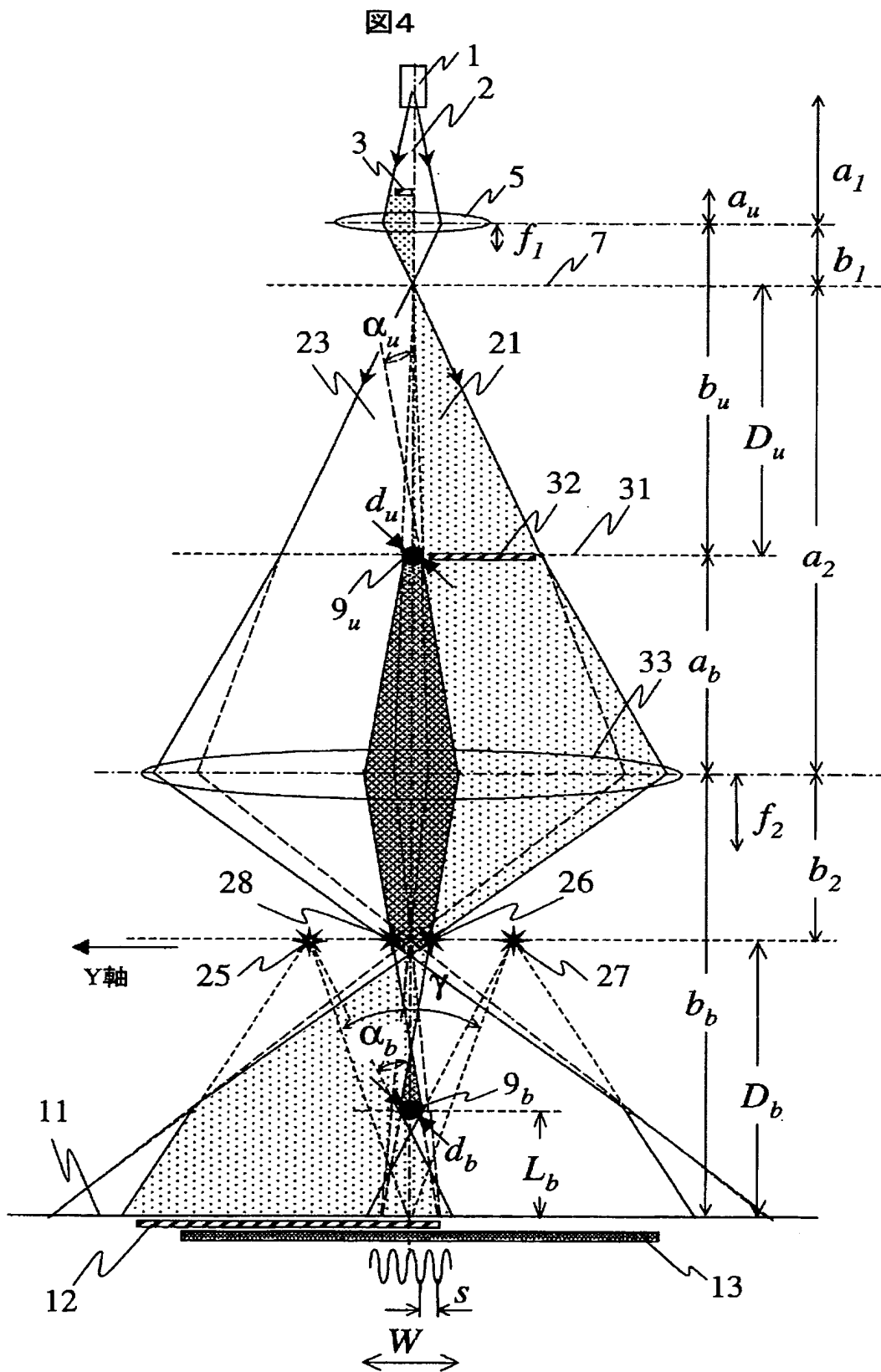


[図3]

図3

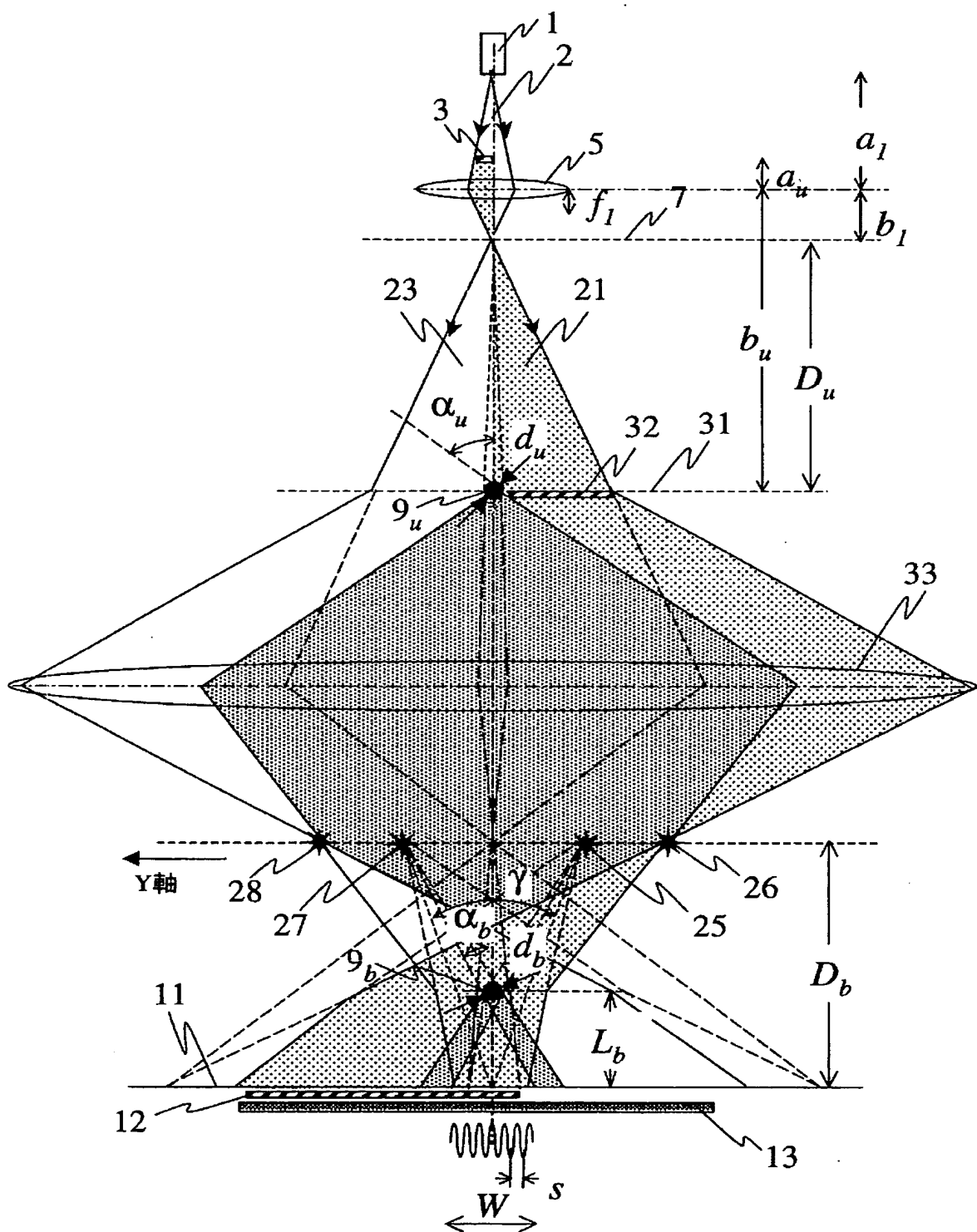


[図4]



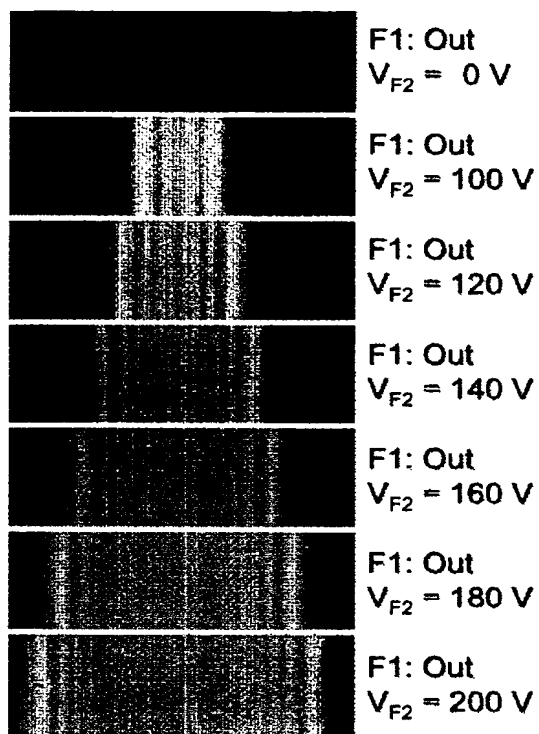
[図5]

図5



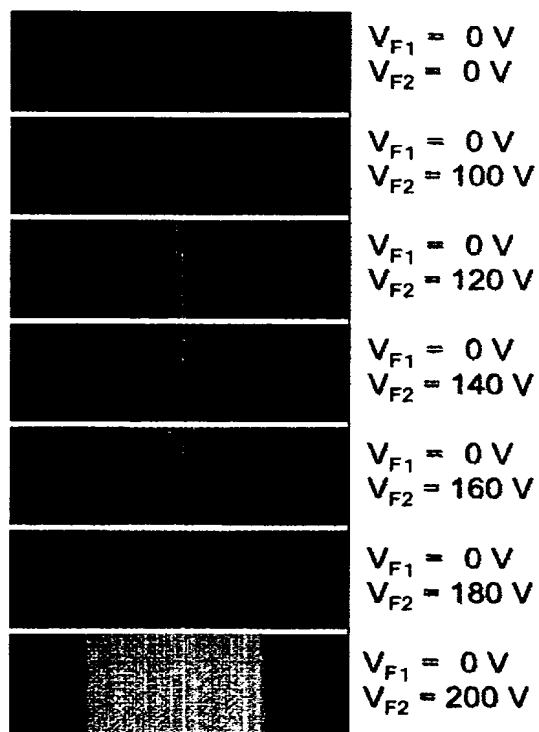
[図6A]

図6A



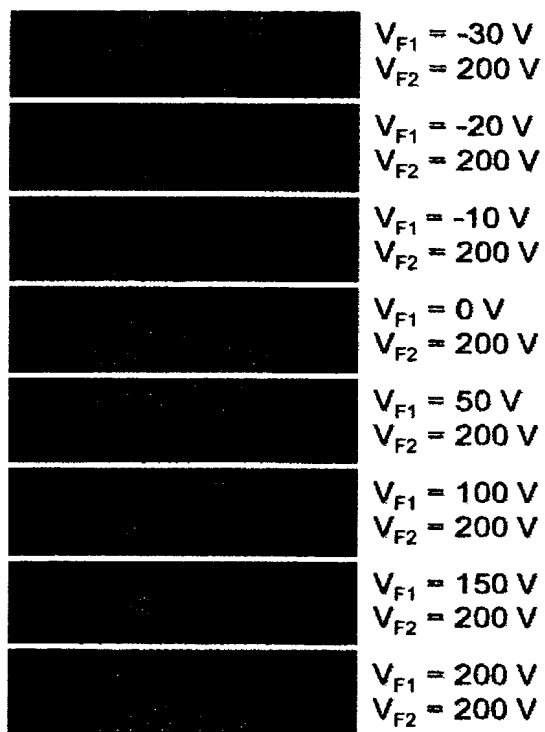
[図6B]

図6B



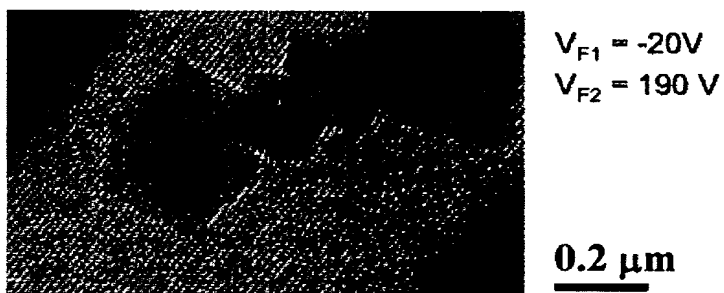
[図6C]

図6C



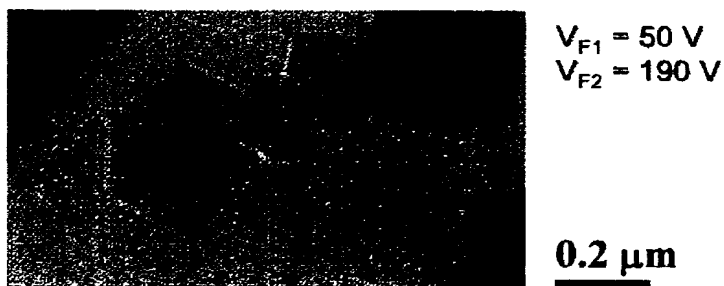
[図7A]

図7A



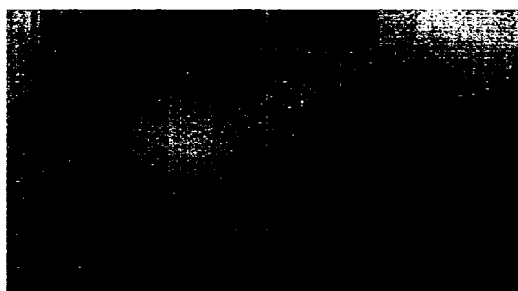
[図7B]

図7B



[図7C]

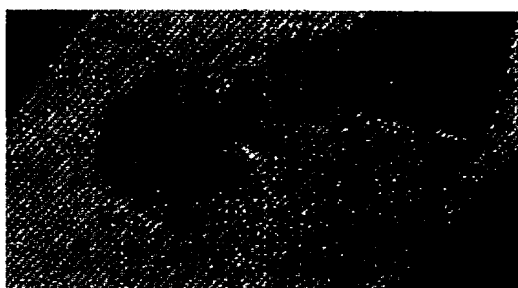
図7C



0.2 μm

[図7D]

図7D



$V_{F1} = -200 \text{ V}$
 $V_{F2} = -190 \text{ V}$

0.2 μm

[図7E]

図7E



$V_{F1} = -250 \text{ V}$
 $V_{F2} = -190 \text{ V}$

0.2 μm

[図7F]

図7F



0.2 μm

图8

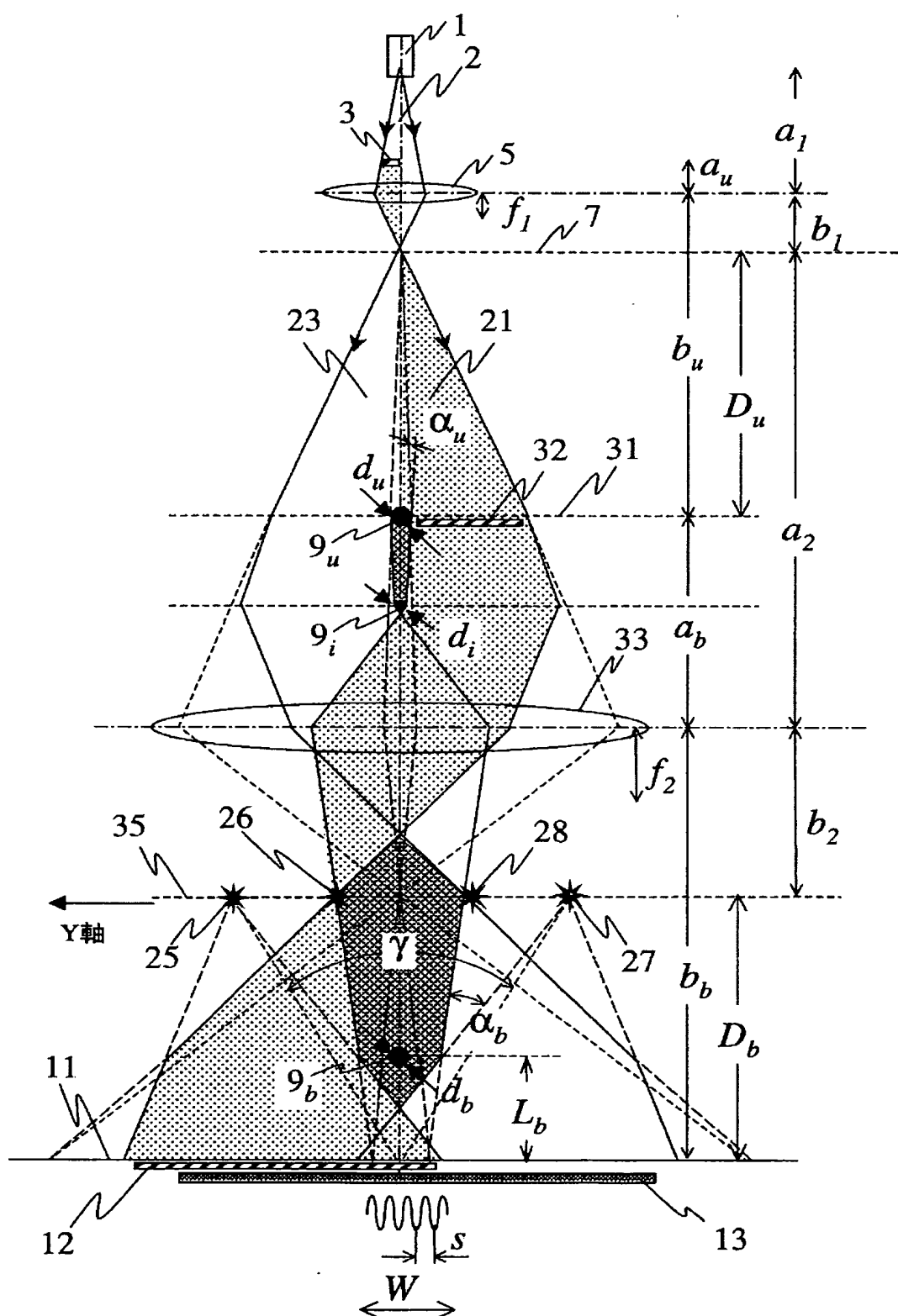
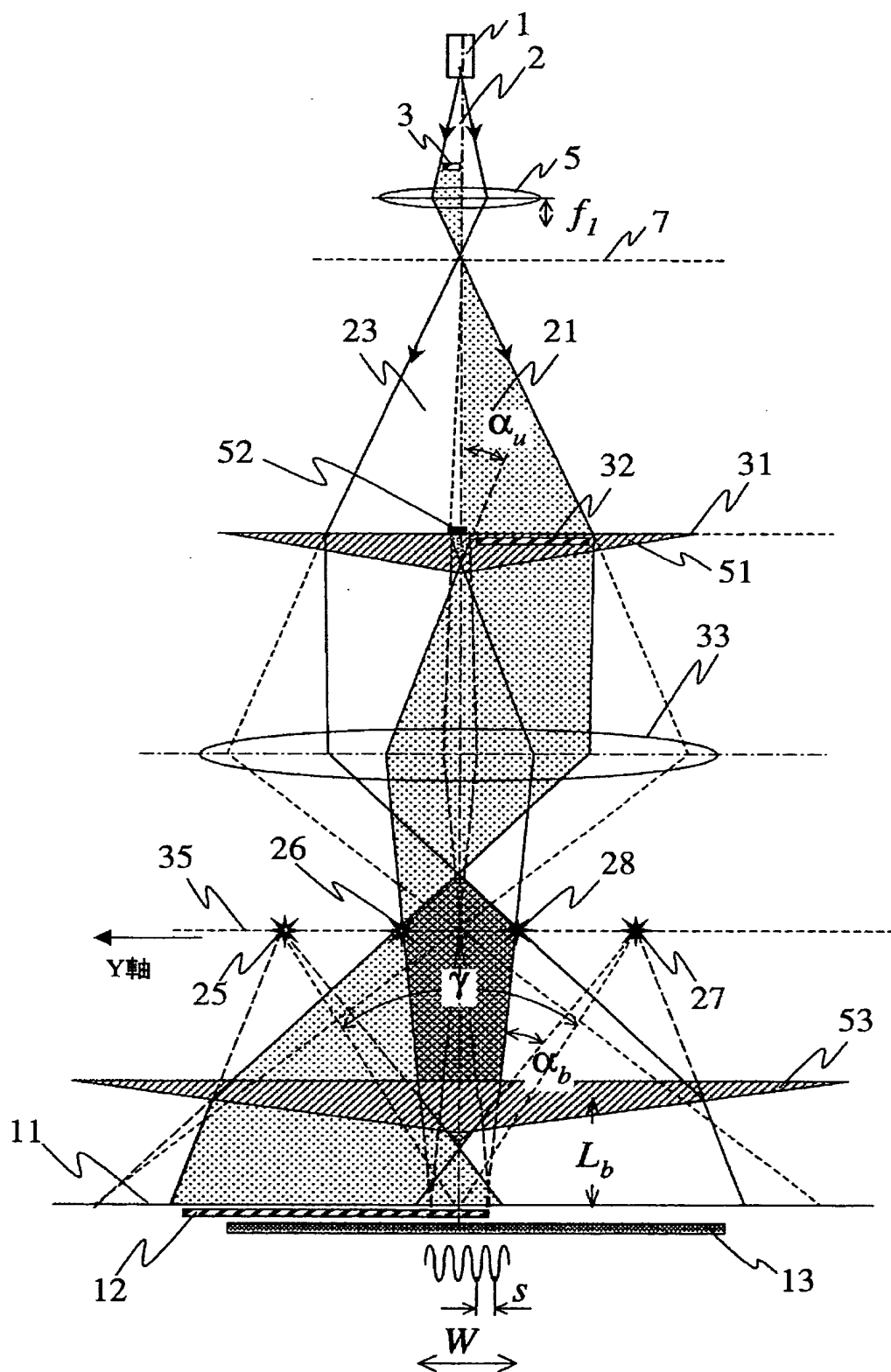
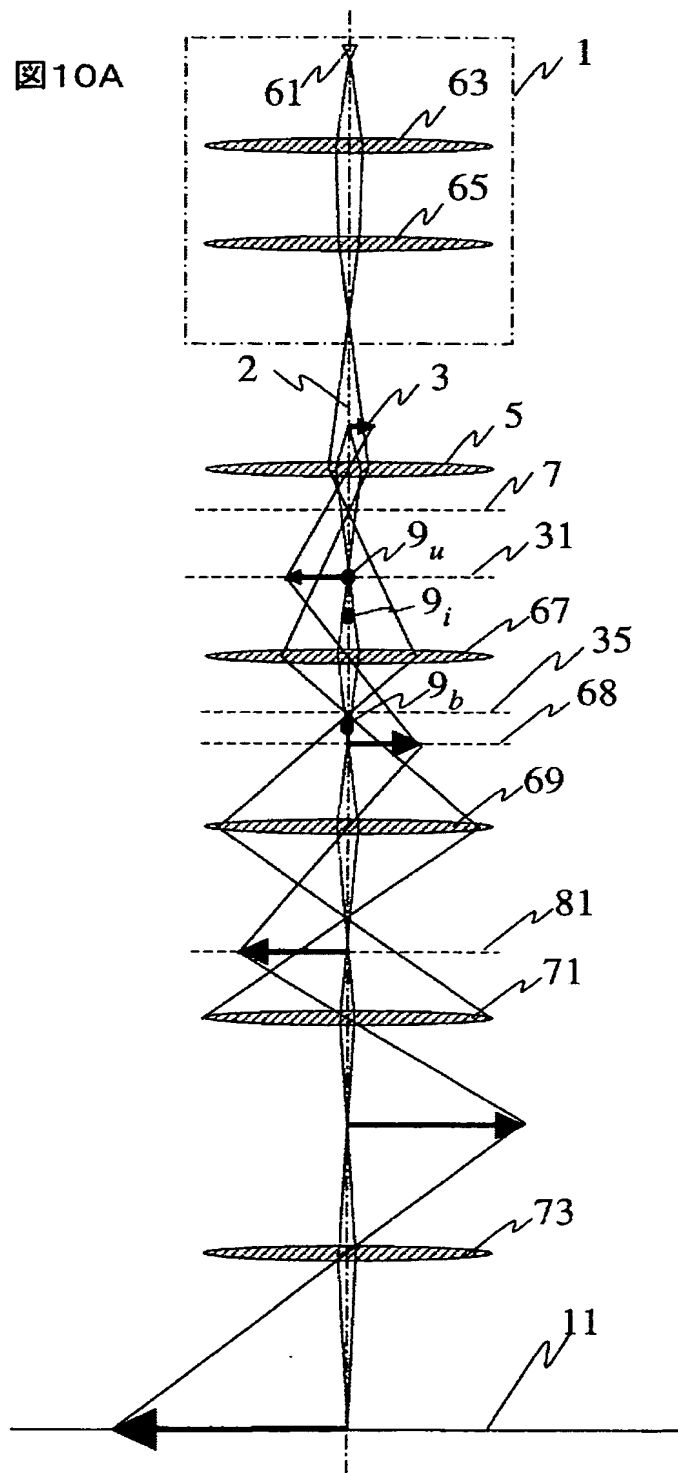


图9

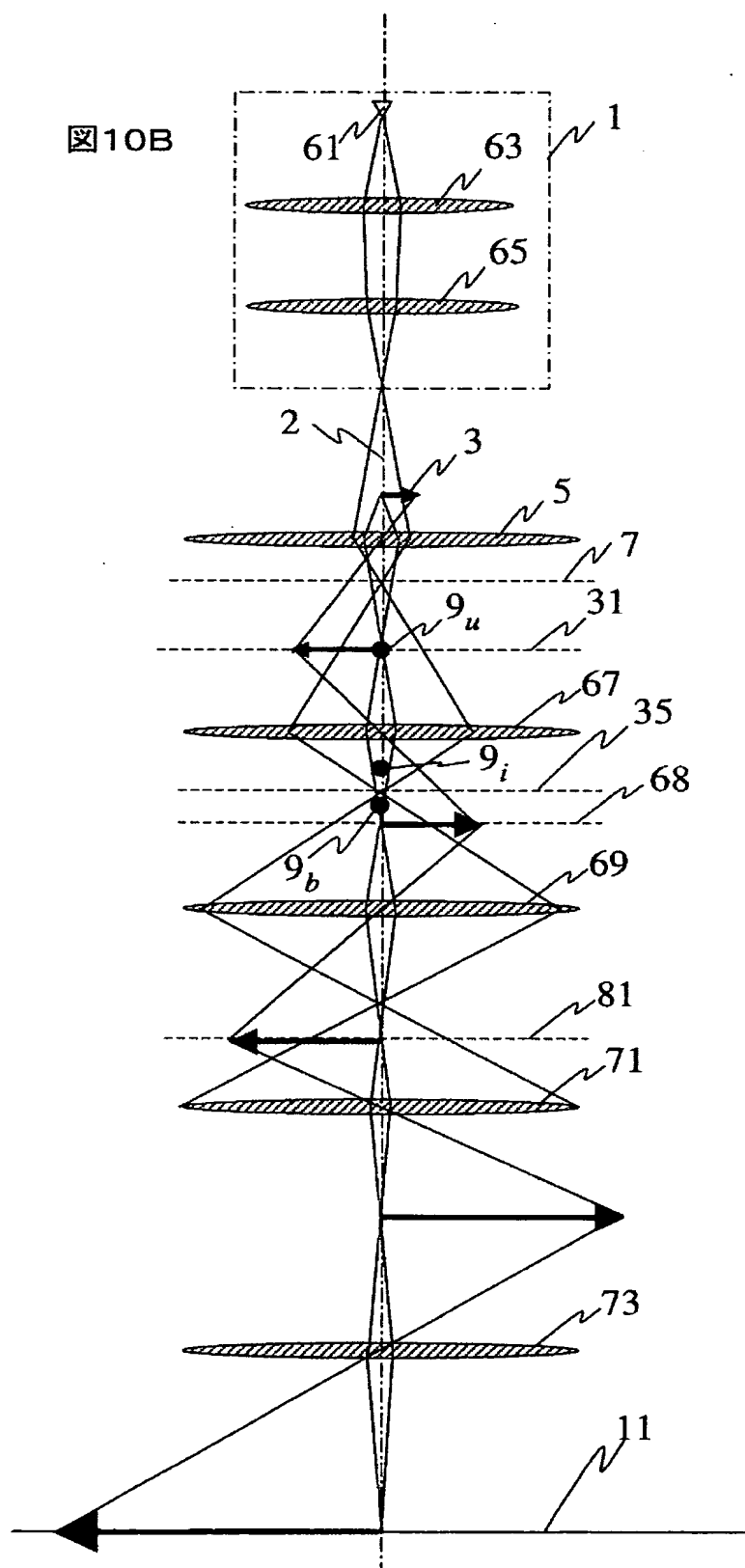


[図10A]

図10A

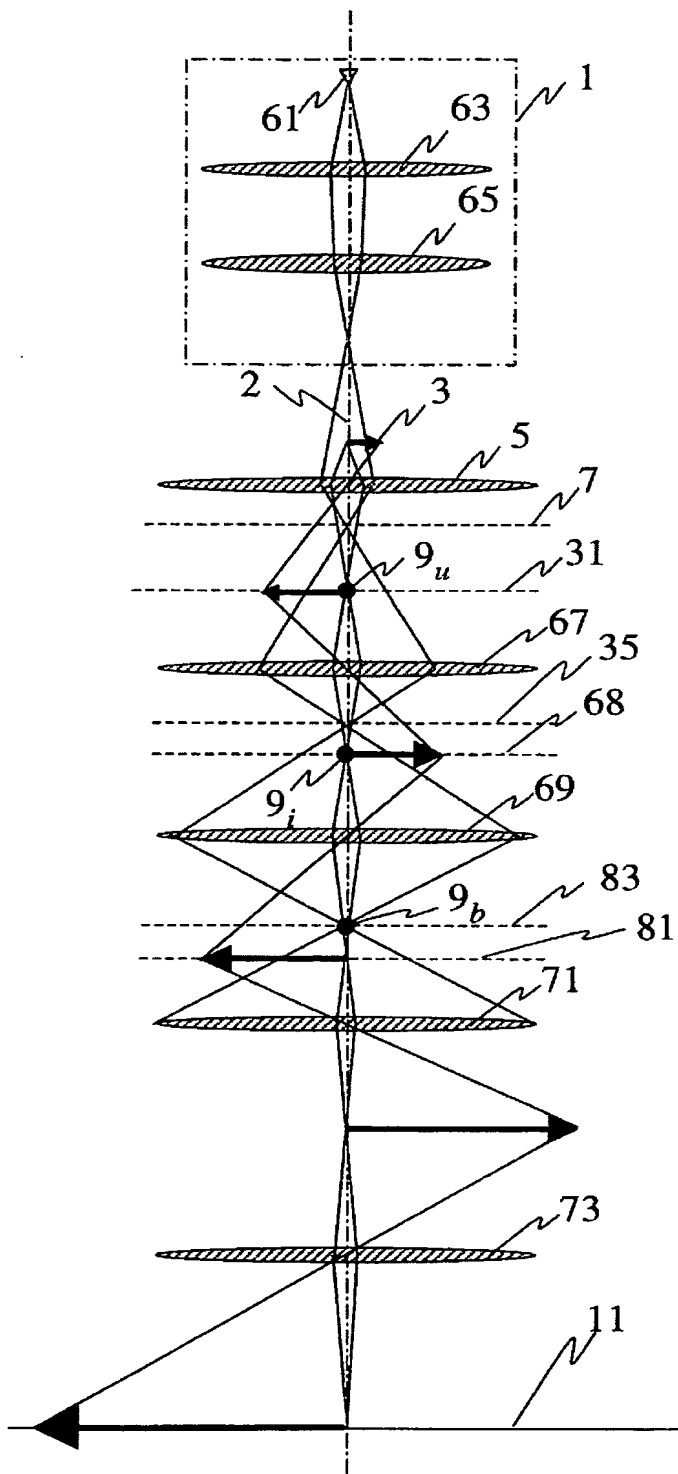


[図10B]

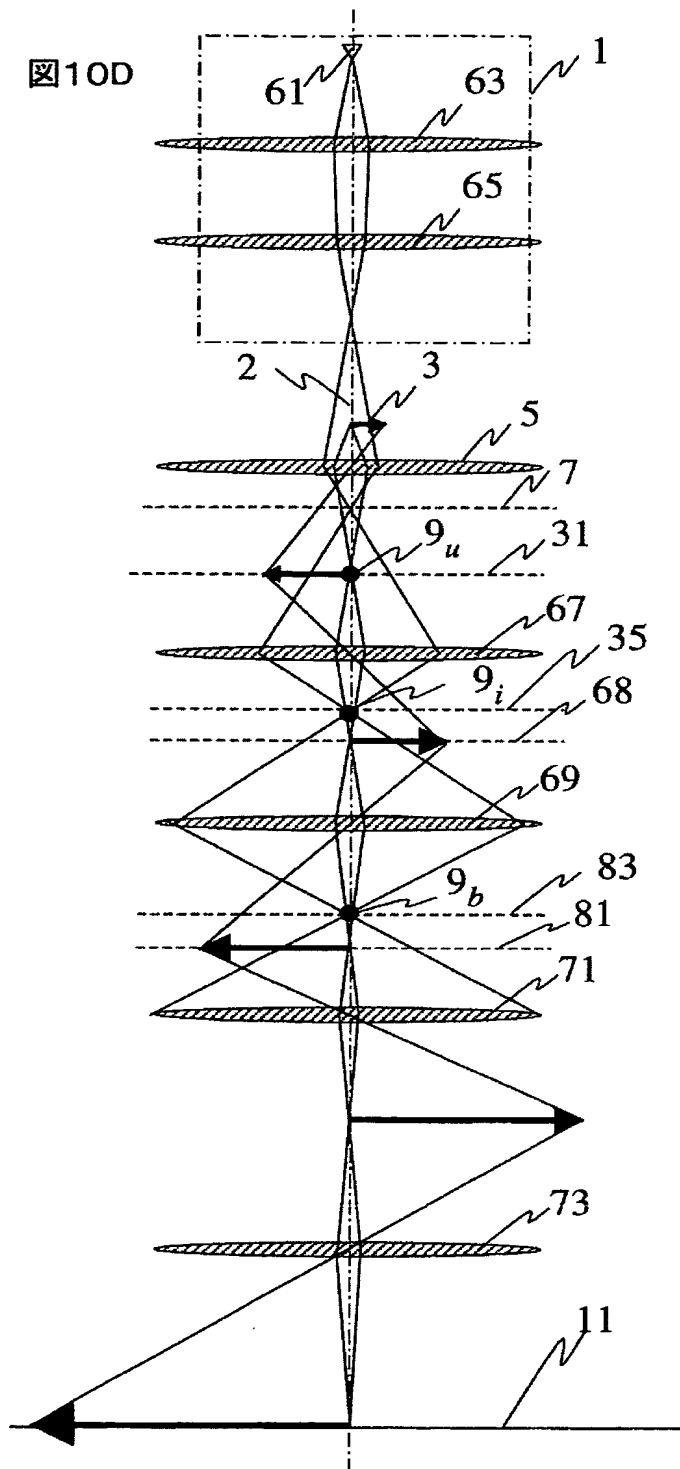


[図10C]

図10C

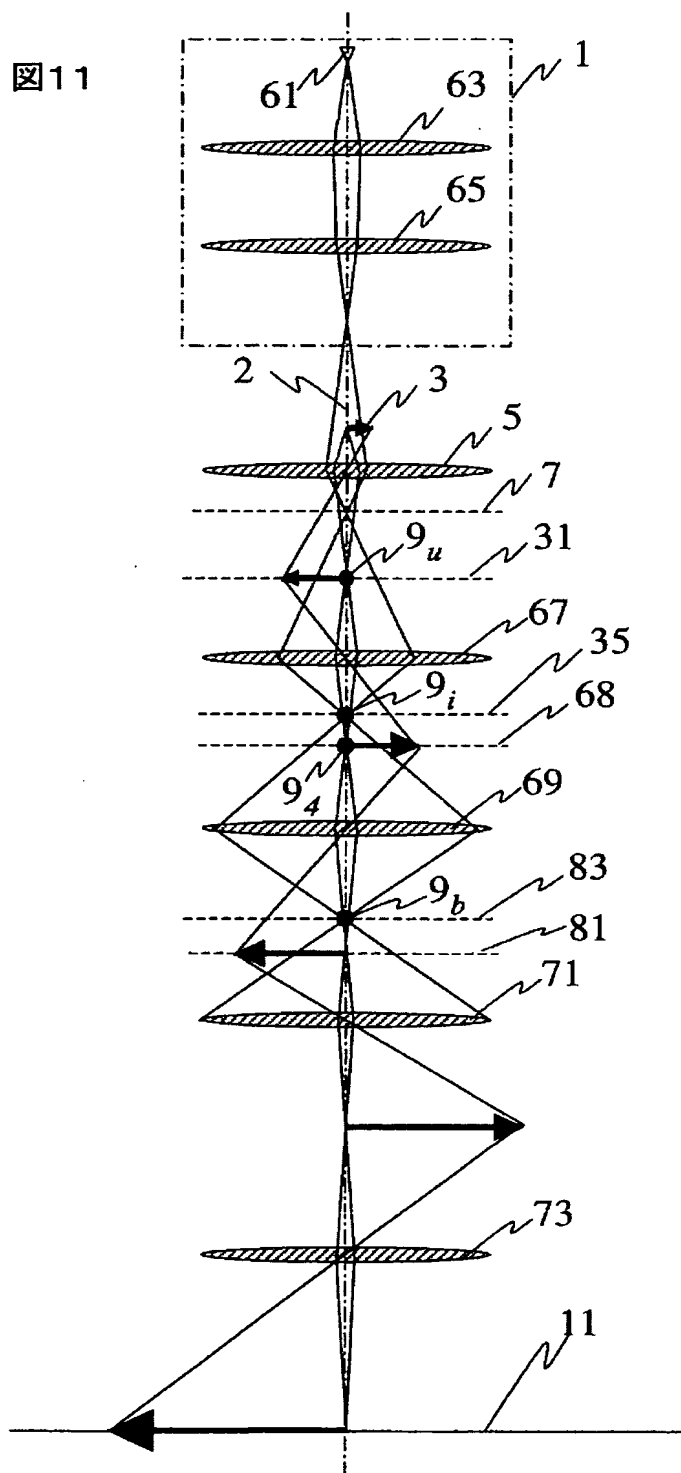


[図10D]



[図11]

図11



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record.**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☒ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☒ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☒ **LINE(S) OR MARK(S) ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.